



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

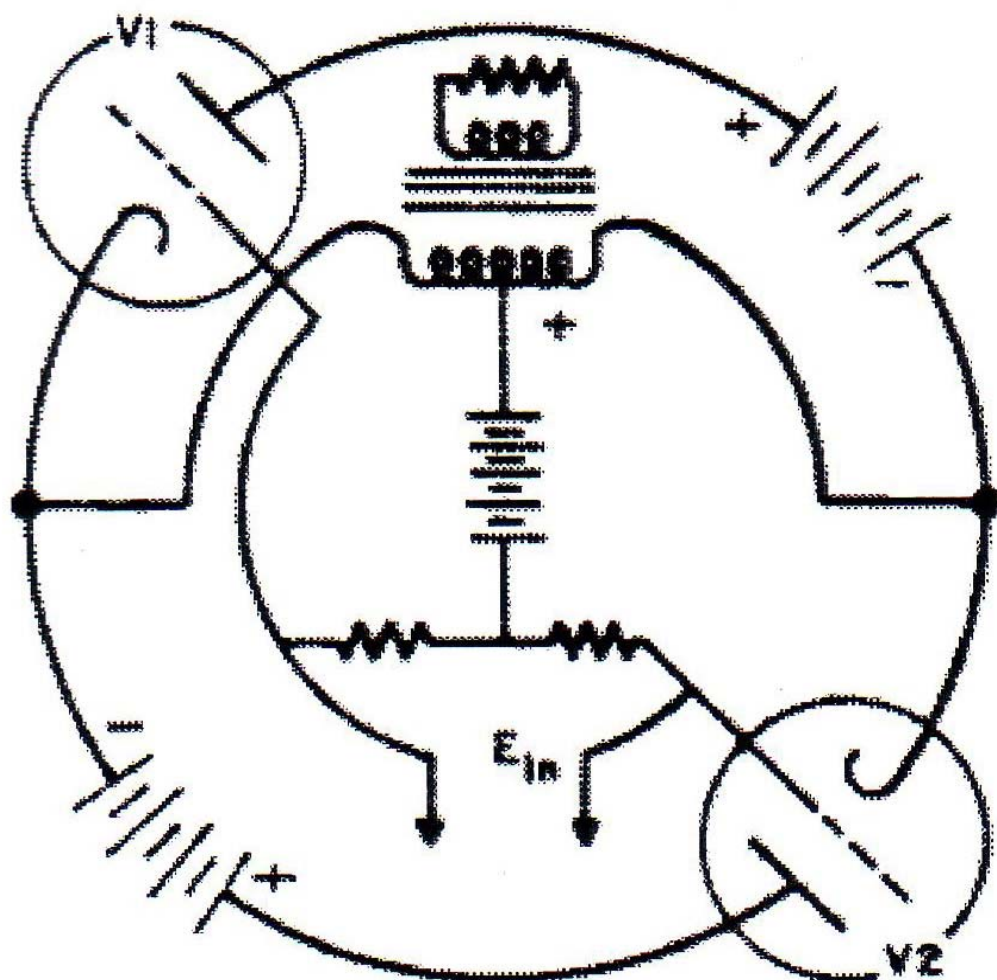
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΛΥΧΝΙΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΧΩΡΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΕΞΟΔΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαριάνθη Γ. Βουμβουλάκη

Επιβλέπων : Γεώργιος Καμπουράκης
Λέκτορας

Αθήνα, Ιούνιος 2005





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΛΥΧΝΙΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΧΩΡΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΕΞΟΔΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαριάνθη Γ. Βουμβουλάκη

Επιβλέπων : Γεώργιος Καμπουράκης
Λέκτορας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Απριλίου.

.....
Γ.Καμπουράκης
Λέκτορας

.....
Ε.Καγιάφας
Καθηγητής

.....
Κ.Λούμος
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2005

Μαριάνθη Γ.Βουμβουλάκη

Διπλωματούχα Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαριάνθη Γ.Βουμβουλάκη,2005

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος

Ευχαριστώ τον Κο Γ.Καμπουράκη που μου εμπιστεύτηκε αυτή τη διπλωματική εργασία αλλά και για τη βοήθεια του.

Ευχαριστώ τον Κο Γ.Νικολόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια του,την καθοδήγηση αλλά και για τον χρόνο που αφιέρωσε για την εκπόνηση της εργασίας.

Ευχαριστώ τους Ν.Μούτσο και όλους όσους με βοήθησαν για την εκπόνηση της εργασίας.

Περίληψη

Οι ενισχυτές ακουστικών συχνοτήτων αποτελούν ένα πολύ μεγάλο κεφάλαιο στο κόσμο της ηλεκτρονικής και απασχολεί πολλούς κατασκευαστές. Οι απόψεις για την απόδοση και γενικότερα για τα χαρακτηριστικά τους ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις και την αισθητική του καθενός. Ακόμα μεγαλύτερη διαφωνία είναι μεταξύ των υπερασπιστών της λυχνίας και των υπερασπιστών των τρανζίστορ. Σκοπός αυτής της εργασίας δεν είναι να αποφανθεί άλλη μία θετική ή αρνητική άποψη για τους ενισχυτές με λυχνίες αλλά να γνωρίσει μία ,πλέον, όχι και τόσο διαδεδομένη τεχνολογία.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται μια αναφορά στις πληροφορίες και στο θεωρητικό υλικό πάνω στο οποίο βασίστηκε η σχεδίαση της κατασκευής του ενισχυτή. Οι πληροφορίες σχετίζονται με τη λειτουργία και τα είδη των λυχνιών. Επίσης έχει συλλεχθεί θεωρητικό υλικό για τις βασικές αρχές των ενισχυτών και τα βασικά είδη ενισχυτικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ήχου. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στους ενισχυτές ισχύος , με τους οποίους και ασχολείται η συγκεκριμένη κατασκευή .

Είναι μια προσπάθεια δημιουργίας μιας έκθεσης στην οποία να μπορεί ο οποιοσδήποτε να πάρει τις αρχικές γνώσεις που πρέπει να διαθέτει για να σχεδιάσει μια απλή ενισχυτική διάταξη . Αλλά κυρίως να μπορέσει να ανακαλύψει και να κατανοήσει τον κόσμο της λυχνίας .Βασικός στόχος είναι η κάλυψη όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών που βοηθούν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μπορεί κάποιος να μελετήσει ή να σχεδιάσει έναν ενισχυτή.

Λέξεις κλειδιά: λυχνία/λυχνίες, τελικός ενισχυτής ,ενισχυτής ισχυος , τροφοδοτικό, μετασχηματιστής εξόδου, αναστροφέας φάσης

Abstract

The audio amplifiers constitute a great chapter in the electronics and set on thinking many electronic constructors. The aspects about the performance and the general characteristics of the amplifiers vary depending on the necessities and the aesthetic of everyone.

The biggest deference is between the tube and the transistor defenders. The purpose in this study is not to defend an option but to get closely with the tube technology. Also there is the fundamental theory of amplifying that is used to the audio systems. A special reference is on the power amplifiers.

This report is an attempt, which will be able to be used by anyone, who would like to get with the audio amplifiers and especially with tube amplifiers. Having all the basic theory of how to study and design an amplifier making easier the way to work on electronic systems, and that is the main intent.

Key words: tube, vacuum tube, OTL, amplification, supply, single-ended amplifier, power amplifier, phase splitter

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Περίληψη

Abstract

Σκοπός.....σελ.7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 11

1.1 Εισαγωγήσελ.11

1.2 Λυχνίες ή στοιχεία στερεάς κατάστασης;.....σελ.11

1.3 Επίλογοςσελ.14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ 15

2.1 Εισαγωγή.....σελ.15

2.2 Κατάταξη ενισχυτώνσελ.16

2.3 Βασικοί τύποι ενισχυτικών διατάξεων με λυχνίεςσελ.19

2.3.1 Ανάλυση με ισοδύναμα κυκλώματα.....σελ.19

2.4 Παραμόρφωση στους ενισχυτέςσελ.24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ 26

3.1 Εισαγωγή.....σελ.26

3.2 Στάδιο εξόδουσελ.26

3.2.1 Μετασχηματιστές ήχουσελ.26

3.2.1.α Ατέλειες του μετασχηματιστήσελ.28

3.2.2 Στάδιο εξόδου μεμετασχηματιστήσελ.28

3.2.3 Στάδιο εξόδου χωρίς μετασχηματιστή εξόδουσελ.30

3.2.3.α Ακόλουθος καθόδουσελ.31

3.2.3.β Κοινή ζκαθόδουσελ.32

3.2.3.γ Push-pull Ακόλουθο ζ καθόδουσελ.32

3.2.3.δ Single ended push –pullσελ.33

3.2.3.ε Τοπολογία Futterman's.....σελ.34

3.2.3.στ) Παραλλαγή στην Τοπολογία Futterman'sσελ.35

3.2.3.ζ Κύκλωτροσελ.36

3.3 Στάδιο οδήγησης.....σελ.37

3.3.1 Διαχωριστής φάσηςσελ.38

3.3.1.α Διαφορικό ζευγάρισελ.38

3.3.1.β Concertina.....σελ.40

3.3.1.γ Αναστροφείας φάσης SCHMITT.....σελ.41

3.4 Στάδιο εισόδου.....σελ.42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 43

4.1 Εισαγωγή.....	σελ.43
4.1.1 Λειτουργία κυκλότρου	σελ.43
4.1.2 Εμπέδηση εξόδου	σελ.45
4.1.2.α Γιατί η εμπέδηση του ηχεΐου αλλάζει με την συχνότητα ;	σελ.46
4.1.2.β Έλεγχος της κίνησης του κώνου	σελ.47
4.1.2.γ Υπολογίζοντας την εμπέδηση εξόδου.....	σελ.47
4.2 Σχεδιασμός και αποφάσεις.....	σελ.48
4.2.1 Επιλογή λυχνιών	σελ.50
4.3 Μοντελοποίηση	σελ.51
4.4 Κατασκευή και προβλήματα	σελ.55
4.5 Εναλλακτικός τρόπος σχεδίασεις	σελ.62
4.6 Αποτελέσματα	σελ.64
4.7 Βελτιώσεις	σελ.67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ 52

5.1 Εισαγωγή.....	σελ.68
5.2 Κατάταξη ανορθωτών.....	σελ.69
5.3 Φίλτρο	σελ.70
5.4 Σταθεροποιητές	σελ.72
5.5 Σχεδίαση τροφοδοτικού.....	σελ.75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΛΥΧΝΙΕΣ 80

6.1 Ιστορική αναδρομή.....	σελ.80
6.2 Μέσα σεμια λυχνία.....	σελ.80
6.2.α Η κάθοδος	σελ.81
6.2.β Η άνοδος	σελ.82
6.2.γ Το πλέγμα	σελ.82
6.2.δ Διαχωριστικό πλέγμα-τέτροδος	σελ.82
6.2.ε Άλλα πλέγματα –πέντοδος.....	σελ.83
6.2.στ) Τέτροδος με δέσμη ηλεκτρονίων.....	σελ.83
6.2.ζ) Το νήμα θέρμανσης στην κάθοδο.....	σελ.83
6.2.η Υλικό απορρόφησης αερίων στο κενό.....	σελ.84
6.3 Λειτουργία λυχνίας	σελ.85
6.4 Σύγχρονη κατασκευή λυχνιών	σελ.89
6.4.1 Οι λυχνίες σήμερα	σελ.90

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ SPICE

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 93

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΛΥΧΝΙΩΝ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ 96

LAYOUT

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 99

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 100

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αρχικά η μελέτη της εσωτερικής λογικής των τελικών ενισχυτών και κατόπιν η ανάπτυξη της δυνατότητας σχεδίασης και κατασκευής ενός τέτοιου ενισχυτή. Μέσα στα πλαίσια της εργασίας επισημαίνεται η διάκριση μεταξύ των ενισχυτών με λυχνίες και αυτών με στοιχεία στερεάς κατάστασης, επιλέγοντας ουσιαστικά με ποια στοιχεία θα μοντελοποιηθεί ο ενισχυτής.

Η πορεία της εργασίας βοηθάει στο να ερθει σε επαφή ο φοιτητής/τρια με την αγορά ηλεκτρονικών εξαρτημάτων προκειμένου να δώσει την βέλτιστη λύση σε κάθε πρόβλημα (οικονομικό κλ.π) , αλλά και τις δυνατότητες που προσφέρονται μέσω της τεχνολογίας στη διαδικασία της κατασκευής(έστω και πειραματικά).

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής συνεισφέρει στο σχηματισμό μιας σφαιρική αντίληψη για την διαδικασία της κατασκευής μιας ηλεκτρονικής διάταξης , όσον αφορά τους τομείς των εργασιών με τους οποίους όποιοσδήποτε κατασκευαστής πρέπει να ασχοληθει. Οι τομείς αυτοί κατά σειρά είναι ,ευρεση υλικού προς μελέτη, μελέτη, προσχεδιασμός διάταξης , έρευνα αγοράς υλικών ,βέλτιστες επιλογές όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και χρήματος ,τελικός σχεδιασμός (με χρήση κατάλληλου λογισμικού) ,τελική μελέτη και σαν τελικός τομέας η κατάσκευή και τα προβλήματα που προκύπτουν κατά την πραγματοποίηση της .

1.1 Εισαγωγή

Ο ενισχυτής είναι μια συσκευή που αυξάνει σε χρήσιμη ισχύ την ισχύ ή την τάση που παράγουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το σήμα εξόδου μπορεί να είναι η ίδια ή διαφορετική κυματομορφή, αλλά σίγουρα το πλάτος του σήματος εξόδου είναι ενισχυμένο.

Οι ενισχυτές μπορούν να κατασκευαστούν είτε με λυχνίες, είτε με στοιχεία στερεάς κατάστασης (τρανζίστορ, μωσφει, τελεστικούς κ.τ.λ). Οι λυχνίες είναι ουσιαστικά απαρχαιωμένης τεχνολογίας για τη σημερινή εποχή των ενισχυτών. Από την μέρα ύπαρξης του πρώτου τρανζίστορ ως ενισχυτικής μονάδας, ξεκίνησαν οι αντιπαραθέσεις μεταξύ των υπερασπιστών της λυχνίας και αυτών των διπολικών ημιαγωγών. Οι αιτίες είναι πολλές συμπεριλαμβανομένης και της συναισθηματικής.

Η κατασκευή των τρανζίστορ ήταν επιτακτική ανάγκη της εποχής. Αυτό προκύπτει από μερικά από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι λυχνίες, όπως είναι το μέγεθος τους, η υπερβολικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος, η ευθραυστότητα τους, η μικρή διάρκεια ζωής και άλλα προβλήματα που θα παρουσιαστούν λίγο αργότερα. Αναμενόμενο λοιπόν στον 20^ο αιώνα όπου όλα γίνονται μέσα σε μικρές κλίμακες όγκου και καταναλώσεις ισχύος (και από οικολογικής άποψης), οι βιομηχανίες να ζητούν αντικαταστάτες της λυχνίας.

1.2 Λυχνίες ή στοιχεία στερεάς κατάστασης;

Ένα από τα μεγαλύτερα ερωτήματα, όσον αφορά την κατασκευή συστημάτων αναπαραγωγής ή εγγραφής ήχου, είναι η επιλογή ανάμεσα στις λυχνίες και στα στοιχεία στερεάς κατάστασης. Οι λόγοι επιλογής μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, μπορεί να είναι και απλή ανθρώπινη ιδιοτροπία ή εμμονή. Πολλοί κατασκευαστές θεωρούν την επιλογή τους σαν αποτέλεσμα ψυχοακουστικής αιτίας.

Τα πλεονεκτήματα των τρανζίστορ σε σχέση με τις λυχνίες είναι πολλά. Όπως προαναφέρθηκε η καταναλισκόμενη ισχύς για την λειτουργία των λυχνιών είναι κατά πολύ μικρότερη στα στερεάς κατάστασης. Μια λυχνία εκτός της τάσης που απαιτείται για το νήμα θέρμανσης, το οποίο στις απλές τριόδους είναι στα 6,3V με 0,325 A, απαιτεί και πολύ υψηλή τάση ανόδου (6^ο κεφάλαιο) συνήθως πάνω από 180V. Ενώ ένα απλό τρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με μερικά volt στον συλλέκτη και στον εκπομπό για μια αξιόλογη τιμή ισχύος εξόδου. Επομένως η αποδοτικότητα των λυχνιών είναι μειωμένη. Ο όγκος επίσης των λυχνιών είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από αυτό των τρανζίστορ, με αποτέλεσμα ο συνολικός όγκος της ενισχυτικής διάταξης να είναι υπερβολικός. Πολλές φορές χρειάζονται δύο διαφορετικά σασί για ένα στερεοφωνικό τελικό ενισχυτή ενώ, ένας στερεοφωνικός με στοιχεία στερεάς κατάστασης καταλαμβάνει το πολύ μια διάτρητη πλακέτα. Οι λυχνίες εκτός από τις κατασκευαστικές ατέλειες που μπορεί να παρουσιάσουν, όπως όλες οι βιομηχανικές κατασκευές (αυτό

ισχύει και για τα τρανζίστορ) , έχουν και την πιθανότητα ραγίσματος του γυάλινου κλωβού κατά την μεταφορά ή λόγω απροσεξίας. Είναι δηλαδή εύθραυστες και το κόστος τους δεν είναι αμελητέο , ώστε να θεωρηθεί μηδαμινό μειονέκτημα. Εν αντίθεση και πάλι με τα τρανζίστορ τα μόσφει και τους τελεστικούς όπου η τιμή τους μπορεί να είναι αμελητέα. Σημαντικό επίσης πρόβλημα είναι η μικρή διάρκεια ζωής των λυχνιών , όπου εξαναγκάζει την αλλαγή τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Κυρίως των λυχνιών εξόδου , όπου μπορούν να υποστούν και την μεγαλύτερη φθορά αν λειτουργούν πάνω από τα ανεκτά όρια τους , για μεγαλύτερη απόδοση.

Παρόλα αυτά οι ενισχυτές με λυχνίες (παντός τύπου) έχουν πιστούς φίλους και μεταξύ τους βρίσκονται και οι περισσότεροι μουσικοί .Είναι σημαντικό που οι ένθερμοι υποστηρικτές δεν είναι μηχανικοί. Αυτό γιατί ο μηχανικός κρίνει περισσότερο τα πράγματα από το αποτέλεσμα των μετρήσεων, ενώ ο μουσικός εμπιστεύεται περισσότερο το αυτί του .Τι είναι λοιπόν αυτό που όλοι ψάχνουν στον ήχο και το βρίσκουν στις λυχνίες ; Όποιος και αν ερωτηθεί δίνει την ίδια απάντηση., « Ο ήχος είναι πιο γλυκός ,πιο ζεστός,πιο απαλός». Τι σημαίνει λοιπόν αυτό;

Ψάχνοντας και μελετώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων πολλών τελικών ενισχυτών με λυχνίες ,με τρανζίστορ και με τελεστικούς , πέρα από τις διαφορές που αναφέρθηκαν, οι μετρήσεις δεν διέφεραν δραματικά μεταξύ τους ώστε να θεωρηθεί ότι υπερέχει ο ένας ενισχυτής σε σχέση με τον άλλο. Υπήρχε όμως κάτι που θα μπορούσε να είναι και η απόδειξη για την διαφορά στην οποία αναφέρονται. Αυτό αφορούσε την παραμόρφωση των αρμονικών.

Στους ενισχυτές με λυχνίες το κυρίαρχο χαρακτηριστικό είναι η ισχυρή παρουσία της δεύτερης και τρίτης αρμονικής , μερικές φορές σε συμφωνία με την τέταρτη και πέμπτη , αλλά πάντοτε με πολύ μεγαλύτερο πλάτος. Αρμονικές μεγαλύτερες της πέμπτης δεν είναι σημαντικές μέχρι η υπερφόρτωση να ξεπεράσει τα 12dB. Η σημαντική διαφορά στους ενισχυτές με λυχνίες , είναι η εναλλαγή της θέσης της δεύτερης και της τρίτης αρμονικής.

Στους ενισχυτές με τρανζίστορ το ξεχωριστό χαρακτηριστικό είναι η εμφάνιση του στοιχείου της τρίτης αρμονικής . Όλες οι υπόλοιπες αρμονικές είναι παρούσες ,αλλά με πολύ μικρότερο πλάτος από αυτό της τρίτης. Όταν η υπερφόρτωση φτάνει στο σημείο αποκοπής , όλες οι υψηλότερες αρμονικές αρχίζουν να μεγαλώνουν, ως προς το πλάτος, ταυτόχρονα. Αυτό το σημείο είναι γενικά μεταξύ των 3-6dB του 1% της τρίτης αρμονικής.

Στους ενισχυτές με τελεστικούς όλες οι άρτιες αρμονικές είναι συμπιεσμένες.(Το πείραμα έχει γίνει με υβριδικό ενισχυτή)

Ποια είναι όμως η σπουδαιότητα των μουσικών αρμονικών; Για να εντοπιστεί το νόημα τους πρέπει να καθοριστεί η σχέση τους με την ανθρώπινη ακοή. Υπάρχει μια κοντινή σχέση μεταξύ της ηλεκτρονικής παραμόρφωσης και του μουσικού χρωματισμού. Αυτή είναι και το πραγματικό κλειδί στη διαφορά της ακουστικής μεταξύ των ενισχυτών με λυχνίες και τρανζίστορ. Ίσως οι βασικότεροι γνώστες σε αυτήν την περιοχή είναι οι κατασκευαστές μουσικών οργάνων. Μέσα από χρόνιο πειραματισμό μπορούν να καθορίσουν πως οι αρμονικές επιδρούν στον χρωματισμό του τόνου του οργάνου.

Ο πρωταρχικός χρωματισμός ενός οργάνου καθορίζεται από την ισχύ των πρώτων αρμονικών. Κάθε μία από τις αρμονικές μπορεί να παράγει το δικό της χαρακτηριστικό αποτέλεσμα όταν είναι κυρίαρχη ή μπορεί να διαμορφώσει το αποτέλεσμα της κύριας αρμονικής όταν είναι σημαντικής τιμής. Στην απλούστερη ταξινόμηση η αρμονικές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις περιπτώσεις που παράγουν «απτόμοιους» ή «καλυμμένους» ήχους και στις άρτιες που παράγουν «γεμάτους» ή «ωδικούς» ήχους.

Η δεύτερη και η τρίτη αρμονική είναι η πιο σημαντικές από την άποψη της παραμόρφωσης. Μουσικά η δεύτερη αρμονική είναι μια οκτάβα πάνω από την θεμελιώδη και σχεδόν δεν ακούγεται, αν και μορφοποιεί τον ήχο , κάνοντας τον πιο γεμάτο. Η τρίτη αρμονική καθορίζεται σαν πεντάτονο ή μουσικό δωδέκατο. Παράγει ένα ήχο που οι μουσικοί τον αναφέρουν σαν «καλυμμένο». Αντί να κάνει τον τόνο πιο γεμάτο , μια ισχυρή τρίτη αρμονική , τον μαλακώνει. Προσθέτοντας μια πέμπτη σε μια τρίτη προσδίδει στον ήχο μια μεταλλική χροιά που γίνεται πολύ ενοχλητική όσο αυξάνεται το πλάτος των αρμονικών. Μια δυνατή τρίτη με μια δυνατή δεύτερη αρμονική τείνει να «ανοίξει» το φαινόμενο του «καλυμμένου» ήχου . Προσθέτοντας την τέταρτη με την πέμπτη στα προηγούμενα αλλάζει ο ήχος σε «ανοιχτής κόρνας» . Οι υψηλότερες αρμονικές πάνω από την έβδομη , δίνουν στον ήχο «αιχμηρές άκρες»

και απότομα κοψίματα . Εάν η άκρη είναι ισορροπημένο στο βασικό μουσικό τόνο , τείνει να ενισχύσει την θεμελιώδη , δίνοντας στον ήχο ανεβασμένο τον τόνο σε δίεση. Πολλές από αυτές τις αρμονικές είναι ασυσχέτιστα μουσικά τόνισματα , όπως η έβδομη, η ένατη και η ενδέκατη. Γι' αυτό πολλές άκρες μπορούν να αποδώσουν έναν οξύ και εκνευριστικό παράφωνο ήχο. Μιας και το αυτί είναι πολύ ευαίσθητο στις υψηλές αρμονικές , ο έλεγχος του πλάτους τους είναι υψίστης σημασίας. Οι προηγούμενες αναφορές δείχνουν ,ότι το φαινόμενο των «άκρων» σχετίζεται άμεσα με την ένταση της νότας. Παίζοντας με μια τρομπέτα (με την μελέτη της οποίας έχουν γίνει οι παραπάνω αναφορές) την ίδια νότα με ένταση ή απαλά, έχει μικρή διαφορά στο πλάτος της θεμελιώδους και των χαμηλών αρμονικών. Όπως και αν έχει πάντως , πάνω από την έκτη αρμονική η αύξηση ή η μείωση στο πλάτος έχει σχεδόν άμεση αναλογία στην ένταση του ήχου. Αυτή η ισορροπία των άκρων (υψηλές αρμονικές) είναι ένα κριτικής σημασίας σήμα έντασης για το ανθρώπινο αυτί.

Η βασική διαφορά μεταξύ των ενισχυτών με λυχνιών και αυτών με στοιχεία στερεάς κατάστασης, όπως φάνηκε από τα προηγούμενα, είναι η αναλογία των αρμονικών που παράγονται στην περιοχή της υπερφόρτωσης.

Οι ενισχυτές με τρανζίστορ εκθέτουν ισχυρά την παρουσία της τρίτης αρμονικής . Αυτή η αρμονική όπως αναφέρθηκε δίνει ένα «καλυμμένο» ήχο, δίνοντας στην εγγραφή ή στην αναπαραγωγή περιορισμένη ποιότητα. Αντιθέτως οι λυχνίες παράγουν ολόκληρο φάσμα από αρμονικές . Ειδικά , όπως έχει προαναφερθεί, έχουν αισθητή παρουσία η δεύτερη , η τρίτη , η τέταρτη και η πέμπτη , δίνοντας ήχο χάλκινου πνευστού. Όσο ένας ενισχυτής μπαίνει στην περιοχή του κορεσμού ,τόσο οι υψηλότερες αρμονικές ενισχύονται, δίνοντας ένταση στον ήχο.

Φέρνοντας σε κορεσμό έναν ενισχυτή με τελεστικούς , παράγει τόσο απότομη αύξηση των ακραίων αρμονικών , που γίνεται δυσάρεστος ο ήχος σε εύρος 5dB.Οι ενισχυτές με τρανζίστορ εκτείνουν αυτή την περιοχή του κορεσμού στα 10 dB και οι ενισχυτές με λυχνίες στα 20dB. Βασικά οι τελεστικοί παράγουν , τρίτη ,πέμπτη και έβδομη αρμονική όταν οδηγηθούν σε κορεσμό με μόνο μερικά dB . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεταλλικό ήχο, με πολύ σκληρές άκρες, που το αυτί τον αντιλαμβάνεται σαν παραμόρφωση. Εφόσον αυτός ο ήχος δεν είναι διακριτικός , ηχεί σαν καθαρό σήμα προειδοποίησης κορεσμού. Συνεπώς οι τελεστικοί δεν δουλεύουν στην περιοχή του κορεσμού, με αποτέλεσμα ένα καθαρό ενισχυμένο ήχο με κανένα χρωματισμό .

Οι ενισχυτές με τρανζίστορ σημειώνουν ένα βόμβο ή λευκό θόρυβο και έλλειψη δύναμης. Ο βόμβος σχετίζεται με τις αιχμές που παράγονται με την στιγμιαία υπερφόρτωση. Η υποψία του λευκού θορύβου είναι συνέπεια του φαινομένου , ότι πολλές υψηλές αρμονικές δεν σχετίζονται μουσικά με την θεμελιώδη. Το αυτί ακούει αυτές τις παραφωνίες σαν είδος θορύβου συνοδευών σε κάθε ξεκίνημα . Η έλλειψη « δύναμης» είναι συνέπεια της ύπαρξης ισχυρής τρίτης , που είναι καλυμμένος μη ακουόμενος ήχος . Αυτό διορθώνεται (με peak inductors) αποτρέποντας όλες τις αιχμές (peaks) να φτάσουν στον κορεσμό .

Τέλος οι ενισχυτές με λυχνίες διαφέρουν από τους άλλους ενισχυτές γιατί μπορούν να οδηγηθούν στο κορεσμό και να λειτουργήσουν χωρίς να προσθέσουν αισθητή παραμόρφωση.

Ο συνδυασμός της αργής αύξησης του πλάτους των υψηλών αρμονικών και η ανοικτή δομή των αρμονικών στον κορεσμό , διαμορφώνει ένα σχεδόν ιδεατό συμπιεστή καταγραφής ήχου. Στο εύρος των ασφαλή 20dB της περιοχής του κορεσμού, ή έξοδος του ενισχυτή αυξάνεται μόλις 2-4dB, λειτουργώντας σαν περιοριστής. Εφόσον οι υψηλές ενισχύονται μέσα σε αυτή την περιοχή ,η ουσιαστική ένταση παραμένει αμετάλλακτη στο αυτί. Αυτό το γεγονός αναγκάζει τα ενισχυμένα σήματα να έχουν φαινομενικά υψηλό επίπεδο, που δεν υποδεικνύεται σε ένα μετρητή έντασης. Οι λυχνίες ακούγονται με μεγαλύτερη ένταση και έχουν καλύτερη αναλογία σήματος προς θόρυβο. Έχουν δυνατό ήχο, λόγω του φυσικού μπρούτζινου ήχου τους .Εφόσον τα δυνατά σήματα μπορούν να ηχογραφηθούν σε υψηλότερα επίπεδα, τα απαλότερα σήματα είναι επίσης με ένταση και έτσι δεν χάνονται μέσα στους θορύβους (κασετών ή πικ-απ), δίνοντας αποδοτικότερα πιο διαυγή ήχο. Η αίσθηση του ενισχυμένου μπάσου σχετίζεται με την παρουσία της δεύτερης και της τρίτης αρμονικής που ενισχύει το φυσικό μπάσο με συνθετικό.

Ουσιαστικά με βάση όλα τα παραπάνω οι λυχνίες χρωματίζουν τον ήχο, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία μπορούν να αποδώσουν μεγαλύτερη πιστότητα στην αναπαραγωγή και στην καταγραφή. Κάθε στοιχείο μπορεί να βρει το ρόλο του ανάλογα με την αισθητική του χρήστη. Στην προκειμένη περίπτωση ο χρωματισμός είναι της αισθητικής μου. Η πιστότητα ίσως να είναι ανάγκη στα συστήματα εγγραφής. Αλλά για την καθημερινότητα, προτιμώ το να δέχομαι ερεθίσματα που ουσιαστικά δεν αντιλαμβάνομαι (παρά μόνο το αυτί μου) αλλά κάνουν την διαφορά στην απόλαυση του ήχου. Ίσως άλλωστε οι λυχνίες να προσδίδουν κάτι που χάνεται στην εγγραφή. Μπορεί να λειτουργεί σαν ένα άταστο όργανο, η σαν Ηπειρώτη ή Ινδό τραγουδιστή που τα περάσματα της φωνής τους δεν βρίσκονται καταγεγραμμένα σε κανένα μουσικό πεντάγραμμο.

1.3 Επίλογος

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται αναφορά στα είδη των ενισχυτικών διατάξεων με λυχνίες. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους ενισχυτές ισχύος και στις τοπολογίες εξόδου, που καθορίζουν ουσιαστικά και την λειτουργία του ενισχυτή. Καθ'όλη την πορεία της εργασίας ελήφθησαν διάφορες αποφάσεις, μεταξύ υπαρχόντων επιλογών οι οποίες αιτιολογούνται στο κάθε κεφάλαιο και ειδικά στο κεφάλαιο της περιγραφής της κατασκευής. Θα παρουσιαστούν όλα τα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια της κατασκευής όπως και οι εναλλακτικές λύσεις τους.

Στόχος της εργασίας είναι η κατασκευή ενός τελικού ενισχυτή με λυχνίες (όπως αποφασίστηκε) χωρίς μετασχηματιστή εξόδου. Ο μετασχηματιστής εξόδου παρουσιάζει πολλά προβλήματα, που θα αναφερθούν παρακάτω, προκαλώντας την ανάγκη εξάλειψής του από το σχεδιασμό των ενισχυτών. Οι ενισχυτές αυτοί ονομάζονται OTL (Output TransformerLess). Οι τοπολογίες εξόδου που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι πολλές και η κάθε μία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά. Κοινός στόχος όλων είναι ελαχιστοποίηση της εμπέδησης εξόδου, που είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός τελικού ενισχυτή. Η επιλογή της τοπολογίας εξόδου είναι από τα πιο σημαντικά σημεία για την σχεδίαση και την κατασκευή του τελικού ενισχυτή, διότι καθορίζει τις απαιτήσεις για το κέρδος ενίσχυσης, την δυνατότητα κυμάτωσης και φυσικά και την πόλωση των προηγούμενων σταδίων (στάδιο εισόδου και οδήγησης). Η επιλεγμένη τοπολογία στην συγκεκριμένη είναι του κύκλωτρο.

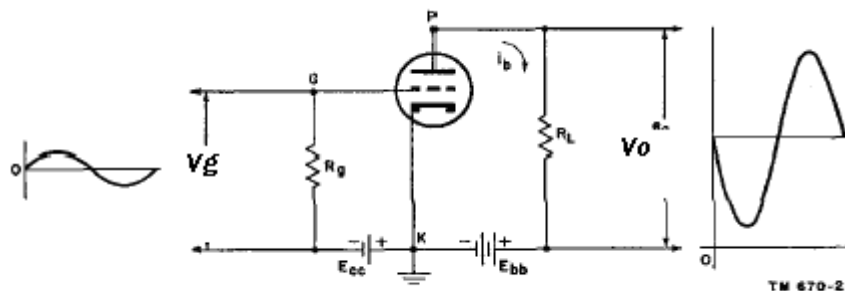
Το κύκλωτρο είναι μια εξελιγμένη μορφή της διάταξης του fullerman που παρέχει μικρότερη αντίσταση εξόδου (όχι την μικρότερη δυνατή), μεγάλη ευστάθεια στο κύκλωμα και δυνατότητα απόδοσης πολλών watt ισχύος. Η επιλογή της έγινε με βάση αναφορές διαφόρων άρθρων για την αξιοπιστία και την καλή συμπεριφορά της. Εκτενέστερη αναφορά για την λειτουργία του κύκλωτρο και για όλες τις επιλογές που έχουν γίνει στην διάταξη του ενισχυτή γίνεται στο κεφάλαιο 4 (κατασκευή).

Στο κεφάλαιο αυτό τεκμηριώνεται η σημαντικότητα της εμπειρίας και η αρχή του απλούστερου δρόμου. Μιας και η σχεδίαση ξεκίνησε από ένα πολύ αισιόδοξο σχέδιο, για να καταλήξει στην απλούστερη μορφή σχεδίασης ενός τελικού ενισχυτή χωρίς μετασχηματιστή εξόδου. Απλά και λιτά, γιατί κάπως έτσι είναι και η λειτουργία της λυχνίας. Για την κατασκευή ενός ενισχυτή και όχι μόνο χρειάζεσαι την πλήρη κατανόηση των φαινομένων που προσπαθείς να δημιουργήσεις (εμπειρία και σωστή γνώση) και την κατασκευή μια σωστής βάσης λειτουργίας πάνω στην οποία θα γίνουν τυχόν αλλαγές και διορθώσεις για τις λεπτομέρειες. Το ατυχές γεγονός ήταν ότι η συγκεκριμένη εργασία ξεκίνησε ανάποδα, κάτι που χρέωσε χρόνο και πολύ κόπο.

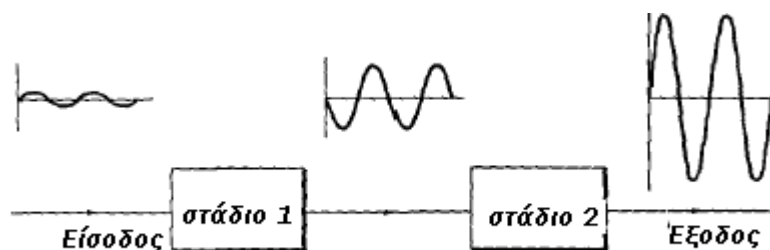
ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ**2.1 Εισαγωγή**

Ένας ενισχυτής μπορεί να αποτελείται από μία ή και περισσότερες λυχνίες (ή αντίστοιχα ημιαγωγούς). Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ένας ενισχυτής λυχνίας κοινής καθόδου. Η πόλωση της ανόδου γίνεται με την E_{bb} συνεχή τάση (μπαταρία). Η είσοδος του σήματος δίνεται στο πλέγμα και ενισχύεται στην άνοδο. Το κέρδος στην διάταξη αυτή μας δίνεται από την σχέση

$A_v = V_{out} / V_{in} = \mu * R_L / (R_L + R_p)$, όπου R_p είναι η εσωτερική αντίσταση ανόδου, R_L το φορτίο και μ το συντελεστής ενίσχυσης (amplification factor). Η πόλωση στο πλέγμα (αρνητική τάση) δίνεται από την E_{cc} . Το ρεύμα που περνάει από το πλέγμα είναι πολύ μικρό έως ανύπαρκτο. Το σήμα εφαρμόζεται στο πλέγμα μέσω της αντίστασης του R_g (grid), η οποία συνήθως παίρνει πολύ μεγάλες τιμές (1M), και προκαλεί μεταβολές στο ρεύμα της ανόδου, το οποίο πλέον αποτελείται από μια dc συνιστώσα (E_{bb}) και μια ac συνιστώσα (του σήματος εισόδου e_g). Η ac συνιστώσα του ρεύματος ανόδου αναπτύσσει μια πτώση τάσης στην αντίσταση R_L . Αυτή η πτώση τάσης έχει μεγαλύτερο πλάτος από το σήμα εισόδου. Αν η αντίσταση φορτίου δεν υπήρχε στο κύκλωμα δεν θα αναπτυσσόταν καμία χρήσιμη τάση.

**Σχήμα 1**

Μπορεί το ρεύμα στην άνοδο να μεταβαλλόταν αλλά η τάση θα παρέμενε κάθε στιγμή σταθερή και ίση με την τάση πόλωσης. Στην περίπτωση που έχουμε περισσότερα από ένα στάδια (λυχνίες) κατά την διαδοχική λειτουργία της ενίσχυσης, η διαμόρφωση αυτής γίνεται όπως στο μπλοκ διάγραμμα 2. Η διαδοχική ενίσχυση απαιτείται στις περιπτώσεις όπου το σήμα είναι πολύ αδύναμο και το ένα στάδιο αποδεικνύεται ανεπαρκές.



Σχήμα 2

Απαραίτητα στοιχεία που χρίζουν μελέτης και φυσικά στοιχεία που γίνεται προσπάθεια να επιτευχθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε ένα ενισχυτή είναι :

Το Κέρδος . Η ενίσχυση εκφράζεται με σύγκριση του πλάτους του σήματος της εξόδου με της εισόδου. Το κλάσμα αυτό ονομάζεται κέρδος τάσης . Η τάση εξόδου μπορεί να αποδίδει περισσότερη ισχύ στο φορτίο από αυτή που λαμβάνει στην είσοδο του , μπορεί όμως και να αποδίδει λιγότερη ή ίση. Άλλες μορφές κέρδους σε ένα ενισχυτή είναι , το κέρδος ρεύματος και το κέρδος ισχύος .

Η Απόκριση Συχνότητας. Οι περισσότεροι ενισχυτές παρέχουν ουσιαστικά το ίδιο κέρδος σε σήματα ελαφρά διαφορετικής συχνότητας. Γύρω από μια περιοχή συχνοτήτων όπου το κέρδος είναι σταθερό , η απόκριση του ενισχυτή εμφανίζεται επίπεδη. Για σήματα μικρότερης ή μεγαλύτερης συχνότητας γύρω από αυτό το εύρος το κέρδος πέφτει απότομα. Είναι ενδιαφέρον στις εφαρμογές των ενισχυτών να γνωρίζουμε το εύρος των συχνοτήτων όπου η απόκριση είναι επίπεδη και πως αναμένεται να λειτουργήσει πέρα από αυτά τα όρια. Αυτό το χαρακτηριστικό ονομάζεται απόκριση συχνοτήτων.

Η Παραμόρφωση. Το επιθυμητό στους ενισχυτές είναι να παράγουν ακριβές ενισχυμένο αντίγραφο της εισόδου. Μερικώς , για να επιτευχθεί αυτό εξαρτάται και από την απόκριση συχνοτήτων του ενισχυτή. Ο ενισχυτής που δεν επιτυγχάνει σε αυτό λέγεται ότι παρουσιάζει παραμόρφωση. Σε μερικές εφαρμογές ο ενισχυτής σχεδιάζεται ώστε να παράγει σε μεγάλο βαθμό παραμόρφωση (π.χ τάξη B)

Η Απόδοση . Οποιαδήποτε επιπρόσθετη ac ισχύς που δεν προέρχεται από το σήμα εισόδου πρέπει να προέρχεται από την τροφοδοσία dc. Όμως ένα μέρος της dc ισχύος είναι άχρηστο, κατά το ότι δεν εμφανίζεται σαν χρήσιμη έξοδος. Η προέκταση σε αυτό που συμβαίνει ονομάζεται απόδοση του ενισχυτή. Σε μεγάλους ραδιοφωνικούς πομπούς αυτό μπορεί να είναι σημαντικό. Αλλά σε συσκευές που διαπραγματεύονται μικρά ποσά ενέργειας , το κέρδος , η παραμόρφωση και η απόκριση συχνοτήτων είναι πιο σημαντικά.

2.2 Κατάταξη των ενισχυτών

Οι ενισχυτές κατατάσσονται με πολλούς τρόπους, σύμφωνα με την περιοχή συχνοτήτων τους ,την μέθοδο λειτουργίας τους , την τελική τους χρήση , τον τύπο του φορτίου , τον τρόπο ενδιάμεσου ζεύξους , τον τύπο ανάδρασης κ.λ.π.

Α) Η κατάταξη με βάση τη συχνότητα περιλαμβάνει ενισχυτές σημάτων: συνεχούς ρεύματος (μηδενικής συχνότητας)

ακουστικών συχνοτήτων (20 Hz – 20 KHz). Χρησιμοποιούνται για την λειτουργία ηχείων ή κινητήρων.

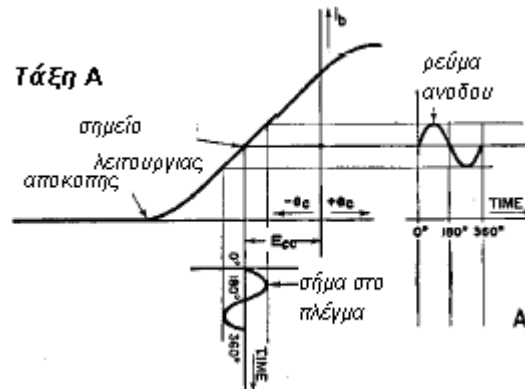
Video ή παλμικούς (ενισχυτές παλμών- έως λίγα megahertz) . Σχεδιάζονται με επίπεδη χαρακτηριστική κέρδους μέσα σε ένα ευρύ πεδίο συχνοτήτων. Ονομάζονται επίσης broad –band ή wide -band και χρησιμοποιούνται όταν η έξοδος επιθυμείται να βρίσκεται σε εύρος μερικών μεγακύκλων. Επειδή ένα σήμα απαρτίζεται από επαναλαμβανόμενους τετραγωνικούς παλμούς περιέχει υψηλές αρμονικές, οι ενισχυτές βίντεο πρέπει να δίνουν ακριβή αναπαραγωγή του σήματος εισόδου.

Ραδιοσυχνοτήτων (από λίγα kilo έως εκατοντάδες megahertz) Χρησιμοποιούνται στους πομπούς ραδιοσυχνοτήτων για να ανεβάζουν την ισχύ τροφοδοσίας στην κεραία και στους δέκτες για να αυξήσουν την ισχύ που λαμβάνεται από την κεραία.

Υπερυψηλών συχνοτήτων . Για συχνότητες μεγαλύτερες από μεγαχερτζ.

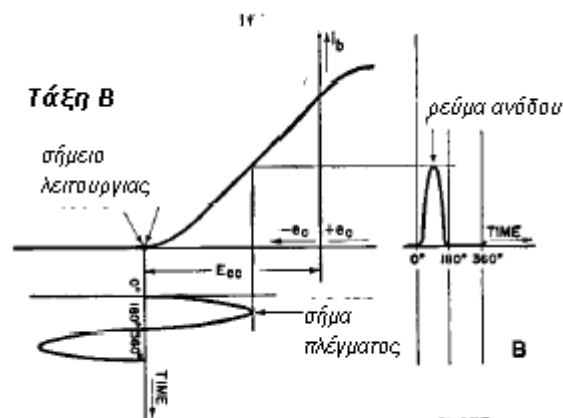
B) Η θέση του σημείου λειτουργίας και η έκταση του χρησιμοποιούμενου τμήματος της χαρακτηριστικής καμπύλης προσδιορίζουν τη μέθοδο λειτουργίας ή την τάξη του ενισχυτή. Έχουμε λοιπόν τις βασικές τάξεις :

Τάξη A. Ενισχυτής τάξεως A είναι εκείνος του οποίου το σημείο λειτουργίας και το σήμα εισόδου είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να κυκλοφορεί καθ' όλη τη διάρκεια στο κύκλωμα εξόδου. Δηλαδή η λειτουργία του πραγματοποιείται στο γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του μέσου (λυχνίας ,τρανζίστορ, FET, MOsFET) . Συγκεκριμένα στις λυχνίες , η πόλωση του πλέγματος και η ac τάση που εφαρμόζεται σε αυτό ρυθμίζονται ώστε το ρεύμα που ρέει στην άνοδο να βρίσκεται στο μέσω του γραμμικού τμήματος της καμπύλης ,όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.



Σχήμα 3

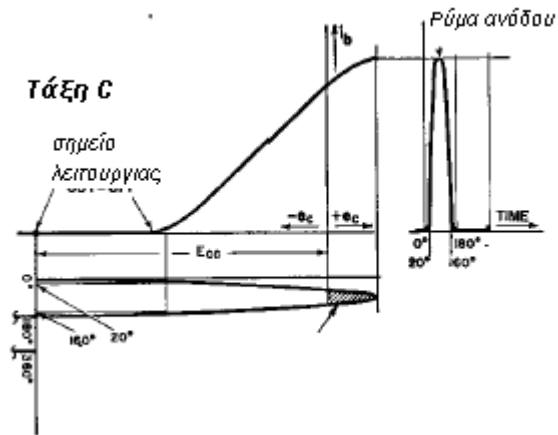
Τάξη B. Ενισχυτές τάξης B είναι εκείνοι στους οποίους το σημείο λειτουργίας βρίσκεται σε ένα απόλυτο άκρο της χαρακτηριστικής καμπύλης ,κατά τρόπο ώστε η ισχύς ηρεμίας να είναι πολύ μικρή. Όστε είτε το ρεύμα ηρεμίας είτε η τάση ηρεμίας να είναι περίπου μηδέν. Εάν το σήμα είναι ημιτονοειδούς τάσεως ,η ενίσχυση λαμβάνει χώρα μόνο κατά το μισό του κύκλου. Όπως φαίνεται και στη λειτουργία της λυχνίας στο σχήμα 4 , η πόλωση του πλέγματος τοποθετείται στην τιμή της τάσης αποκοπής. Η τάξη B όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζει υψηλή παραμόρφωση , λόγω της διαφοράς της κυματομορφής του σήματος εισόδου και εξόδου. Η παραμόρφωση μπορεί να περιοριστεί από την συνδεσμολογία (push –pull) δύο λυχνιών (ή ημιαγωγών) σε τάξη B ,όπου ή κάθε μία άγει στο μισό του κύκλου .



Σχήμα 4

Τάξη AB. Οι ενισχυτές της τάξεως AB είναι εκείνοι οι οποίοι λειτουργούν μεταξύ των δύο άκρων που ορίζονται από τις τάξεις A, B . Το σήμα εξόδου είναι μηδενικό για λιγότερο από το μισό του κύκλου του ημιτονοειδούς σήματος

εισόδου . Δηλαδή στις λυχνίες η πόλωση του πλέγματος είναι μικρότερη από την τιμή της αποκοπής αλλά μεγαλύτερη από αυτή της τάξης A.



Σχήμα 5

Τα χαρακτηριστικά αυτών των ενισχυτών είναι παρόμοια με της τάξης A αλλά έχουν μεγαλύτερη παραμόρφωση .

Τάξη C Ενισχυτές της τάξεως αυτής είναι εκείνοι στους οποίους το σημείο λειτουργίας ορίζεται κατά τρόπο ώστε το ρεύμα εξόδου να είναι μηδενικό για περισσότερο από το μισό του κύκλου του ημιτονοειδούς σήματος .

Οι τάξεις αυτές ισχύουν και στα στερεάς κατάστασης και στις λυχνίες. Στην περίπτωση όμως των λυχνιών παρουσιάζεται και μία άλλη υποκατηγορία. Στις κλάσεις A, AB που ακολουθεί αριθμός '1' , υποδηλώνει ότι δεν παρουσιάζεται ρεύμα πλέγματος σε κανένα τμήμα του κύκλου, ενώ με τον αριθμό '2' υποδηλώνει ότι ρέει ρεύμα πλέγματος τουλάχιστον κατά τμήματα του κύκλου.

Γ) Επίσης πραγματοποιείται ταξινόμηση σε σύγκριση με το μέγεθος των σύνθετων αντιστάσεων εισόδου- εξόδου ενός ενισχυτή σχετικά με τις αντιστάσεις πηγής και φορτίου αντίστοιχα.

Αυτοί αναφέρονται ως:

ενισχυτής τάσεως ,όπου παράγεται μια τάση εξόδου ανάλογη της τάσεως εισόδου. Πρωτεύον μέλημά τους είναι η μεταφορά μεγάλων μεταβαλλόμενων σημάτων στο φορτίο εξόδου. Για αυτό η εμπέδηση φορτίου για ένα ενισχυτή τάσεως είναι μεγάλη ,ώστε να μπορεί να αναπτύσσει μεγάλες τάσεις στα άκρα της.

ενισχυτής ρεύματος ,όπου παράγεται ρεύμα εξόδου ανάλογο του ρεύματος εισόδου

ενισχυτής διαγωγιμότητας, όπου παράγεται ρεύμα εξόδου ανάλογο της τάσεως εισόδου :ισχύος

ενισχυτής διανιστάσεως, όπου παράγεται τάση εξόδου ανάλογη του ρεύματος εισόδου

Δ)Ο διαχωρισμός των ενισχυτών με βάση την τελική τους χρήση (το μέγεθος που ενισχύεται) είναι τάσεως ,ρεύματος, ισχύος και γενικής χρήσεως.

Άλλη μία κατάταξη γίνεται με βάση αν ο ενισχυτής θα παράσχει ενισχυμένη τάση ή ενισχυμένη ισχύ. Για τους ενισχυτές τάσεως έχουμε ήδη αναφερθεί. Ο ενισχυτής ισχύος χρησιμοποιείται για την απόδοση ισχύος στο κύκλωμα του φορτίου. Η ενίσχυση της ισχύος είναι το κλάσμα ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Η ευαισθησία ισχύος περιγράφει την ενίσχυση της ισχύος όταν δεν εφαρμόζεται κανένα σήμα στο πλέγμα εισόδου και καθορίζεται από το κλάσμα της ισχύος εξόδου προς την rms τιμή της τάσεως του σήματος του πλέγματος. Η Εμπέδηση του φορτίου για την ενίσχυση της ισχύος , επιλέγεται να αποδίδει μέγιστη ισχύ εξόδου σε συγκεκριμένες συνθήκες παραμόρφωσης και απόδοσης. Η απόδοση της ανόδου καθορίζεται από το κλάσμα ac ισχύος εξόδου προς την dc ισχύ εισόδου.

Τα περισσότερα συστήματα ήχου είναι ένας συνδυασμός των παραπάνω .

Ε) Διαχωρισμός με βάση την σύζευξη. Υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι σύζευξης με το φορτίο ή με το ακόλουθο στάδιο. Αυτοί είναι 1) Σύζευξη αντίστασης 2) σύζευξη με μετασχηματιστή 3) Σύζευξη εμπέδησης 4) Άμεση ζεύξη.

2.3 Βασικοί τύποι ενισχυτικών διατάξεων με λυχνίες

Ο σχεδιασμός των ενισχυτικών σταδίων με λυχνίες είναι μια απλή διαδικασία σε σχέση με το σχεδιασμό γραμμικών κυκλωμάτων με στερεάς κατάστασης, ίσως γιατί στις λυχνίες δεν υπάρχουν πολλές επιλογές. Οι λυχνίες έχουν επίσης σχετικά γραμμικές χαρακτηριστικές μεταφοράς εισόδου και εξόδου, για αυτό και απαιτούν λιγότερες ρυθμίσεις για την βελτίωση της λειτουργίας του κυκλώματος.

2.3.1 Ανάλυση με ισοδύναμα κυκλώματα

Στους ενισχυτές χαμηλών συχνοτήτων η μόνη ουσιαστική επιλογή είναι ανάμεσα στις πεντόδους και στις τριόδους. Οι βασικές ενισχυτικές διατάξεις λυχνιών που αναλύονται παρακάτω αναφέρονται στις τριόδους, τα ίδια όμως ισχύουν και για τις πεντόδους.

Η ανάλυση των κυκλωμάτων μπορεί να απλοποιηθεί με τη χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος και διαφόρων κανόνων που εξάγονται από τις εκφράσεις των διαφόρων σταθερών μεταφοράς των σταδίων EC(γειωμένης καθόδου), EA(γειωμένης ανόδου), EG(γειωμένου πλέγματος). Η τροποποίηση αφορά την αντανάκλαση, όλων των πηγών τάσεως και των αντιστάσεων του κυκλώματος, του επιλεγμένου ηλεκτροδίου (συνήθως το ηλεκτρόδιο εξόδου –ανόδου ή καθόδου)

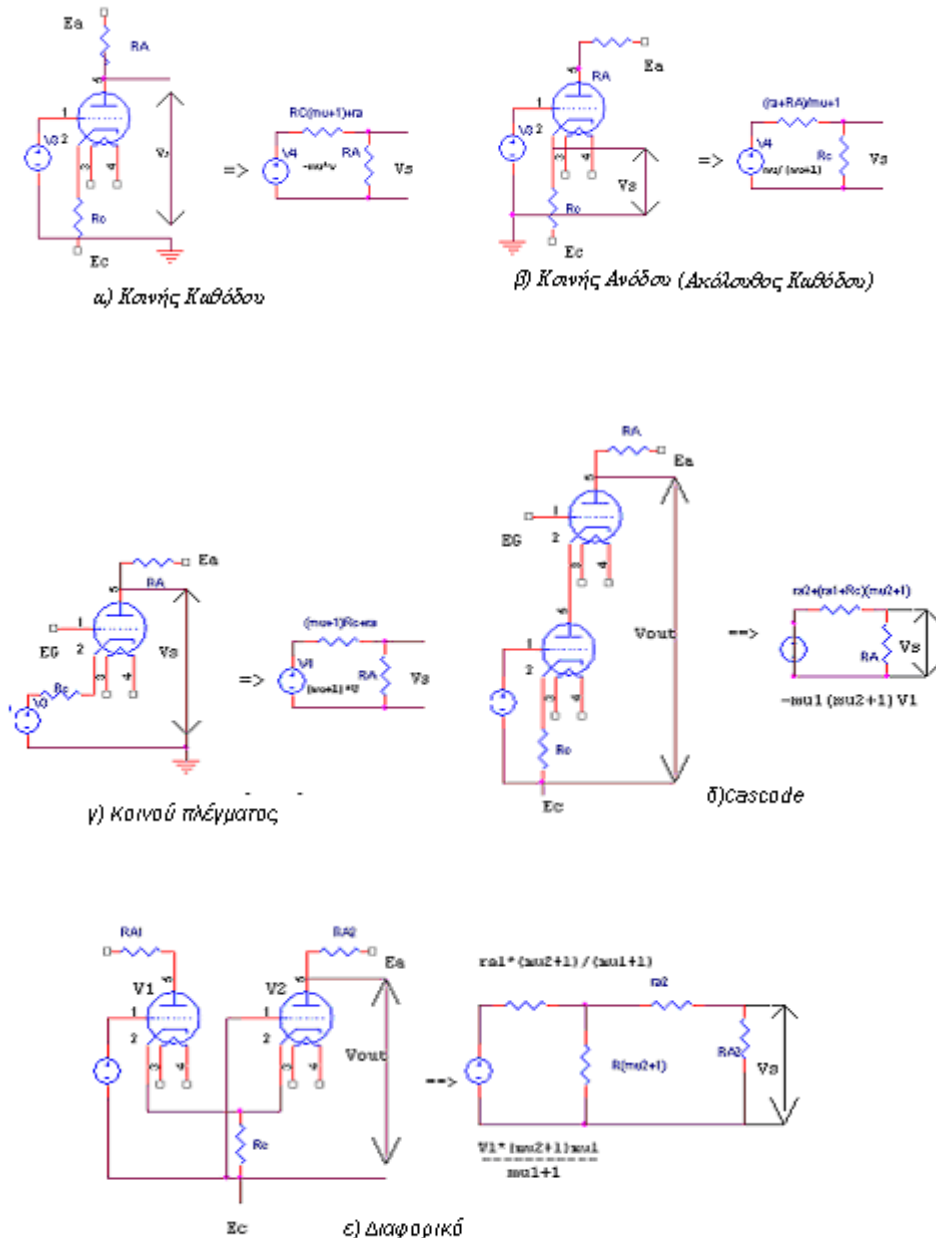
α) Η τάση μεταξύ του πλέγματος και του κοινού σημείου (πιθανόν γη) του σταδίου μετατρέπεται στο κύκλωμα ανόδου σαν $-\mu^*u$ (συντελεστής ενίσχυσης λυχνίας επί την είσοδο).

β) Η αντίσταση ανόδου της λυχνίας R_p , εισάγεται στο κύκλωμα ανόδου χωρίς αλλαγή.

γ) Οι πηγές τάσεως και οι αντιστάσεις μεταξύ καθόδου και του κοινού σημείου του σταδίου, όπως τις κοιτάξεις από την άνοδο εμφανίζονται με τον αυξητικό παράγοντα $(\mu+1)$.

δ) Η αντίσταση ανόδου της λυχνίας όπως και οι αντιστάσεις και οι τάσεις μεταξύ ανόδου και του κοινού σημείου του σταδίου μετατρέπονται στο κύκλωμα καθόδου πολλαπλασιάζοντας αυτές με τον παράγοντα $1/(\mu+1)$.

Με βάση τα παραπάνω και τις βασικές κυκλωματικές διατάξεις εξάγονται τα ισοδύναμα κυκλώματα τους και παρουσιάζονται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Διατάξεις και τα ισοδύναμα των ενισχυτικών διατάξεων

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι η R_p , g_m και μ (ή μ_0) είναι οι ac παράμετροι των λυχνιών και καθορίζονται στο σημείο τομής (σημείο λειτουργίας) των χαρακτηριστικών μιας λυχνίας και της γραμμή φορτίου της κυκλωματικής διάταξης. Φυσικά οι τιμές αυτών αλλάζουν με την αλλαγή του επιλεγμένου σημείου λειτουργίας, είναι δηλαδή μεταβλητά μεγέθη που καθορίζονται από την πόλωση που επιλέγουμε.

Το μ ονομάζεται συντελεστής ενίσχυσης και δεν έχει μονάδες. Καθορίζεται από το κλάσμα της μεταβολή της τάσεως ανόδου ΔV_a προς την αντίστοιχη μεταβολή της τάσεως του πλέγματος ΔV_g .

$$\mu = \Delta V_a / \Delta V_g.$$

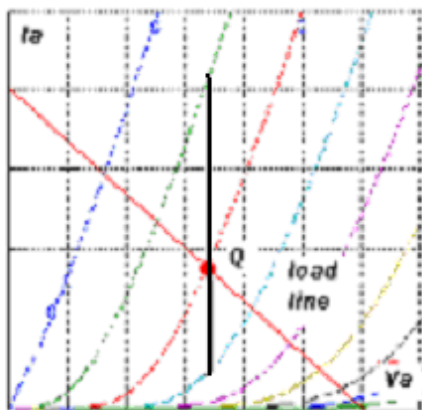
Η με άλλα λόγια, είναι το μέγιστο δυνατό κέρδος τάσης της λυχνίας, και μπορεί να επιτευχθεί με την αντίσταση φορτίου, R_L , να τείνει στο άπειρο. Πρακτικά για τον υπολογισμό του, στο σημείο λειτουργίας τραβάμε μια οριζόντια γραμμή (παράλληλη στον άξονα της V_a) και υπολογίζουμε σημειώνοντας τις διασταυρώσεις με τις γραμμές του πλέγματος (σχήμα 7)

Το g_m ονομάζεται συντελεστής διαγωγιμότητας : Καθορίζεται από το κλάσμα της μεταβολής του ρεύματος ανόδου ΔI_a προς τη μεταβολή της τάσης του πλέγματος ΔV_g με την τάση ανόδου σταθερή.
 $g_m = \Delta I_a / \Delta V_g$ (mA/V)

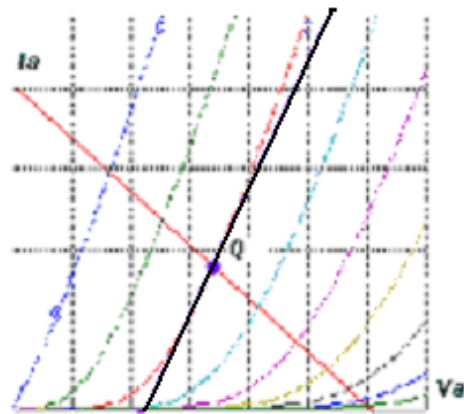
Η αντίσταση ανόδου είναι η εσωτερική αντίσταση της λυχνίας και καθορίζεται σαν τον λόγο της μεταβολής της τάσεως ανόδου προς την μεταβολή του ρεύματος ανόδου, για σταθερή τιμή της τάσεως πλέγματος.

$$R_p = \Delta V_a / \Delta I_a \quad (\Omega)$$

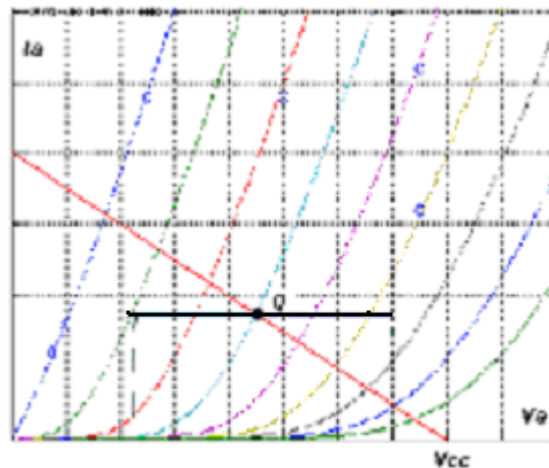
Μια πολύ χρήσιμη σχέση που συνδέει τις παραπάνω παραμέτρους είναι $g_m = \mu / R_p$. Είναι ιδανική και ανασχηματίζεται για τον υπολογισμό της τρίτης παραμέτρου αν είναι γνωστές οι δύο άλλες. Πάντα εισέρχονται σφάλματα στους υπολογισμούς, είτε λόγω των ανακριβών γραφικών, είτε σφάλματα μετρήσεων με τον χάρακα κ.τ.λ



Υπολογισμός διαγωγιμότητας (g_m)



Υπολογισμός αντίστασης (r_p)



Υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης (μ)

Σχήμα 7

Ο ενισχυτής κοινής καθόδου όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 6.α καθόδου με τρίοδο ή πέντοδο είναι από τις πιο γνωστές διατάξεις ως στάδιο εισόδου σε ένα ενισχυτή, όπως επίσης και ο διαφορικός ενισχυτής. Ο κοινής καθόδου είναι ένας ενισχυτής τάσης με δυνατότητα να αποδίδει δύο εισόδους μία

αναστρέψιμη και μία μη αναστρέψιμη, και οι δύο με χαμηλό θόρυβο και φυσικά με δυνατότητα εύκολης ρύθμισης του κέρδους (αλλάζοντας την αντίσταση R_a)

Στον ακόλουθο καθόδο (6.β) η τάση πόλωσης επιλέγεται ώστε να ρέει ένα κατάλληλο ρεύμα καθόδου και να διατηρεί τις DC συνθήκες λειτουργίας της λυχνίας σε κατάλληλη θέση των χαρακτηριστικών I_a/V_a . Η κύρια χρήση του είναι να μετατρέπει το σήμα εισόδου του υψηλής εμπέδησης σε ένα πανομοιότυπο σήμα εξόδου χαμηλής εμπέδησης. Χρησιμοποιείται δηλαδή ως απομονωτής μιας και το κέρδος τάσης είναι κοντά στη μονάδα. Αυτή του η λειτουργία είναι σημαντική, διότι μπορούμε να απαλλαγούμε από τους μετασχηματιστές ζεύξης και από τα προβλήματα που δημιουργούν.

Ο ακόλουθος μ (λυχνιών) είναι ένας τρόπος για ενισχυμένο κέρδος από μία ενισχυμένη λυχνία ($V1$) χρησιμοποιώντας σαν ενεργό φορτίο ανόδου ένα ακόλουθο καθόδο ($V2$). Το κύκλωμα του ακόλουθου καθόδου μας δίνει χαμηλή εμπέδηση εξόδου και σαν ενεργό στοιχείο αυξάνει δραστικά το κέρδος του σταδίου της $V1$. Το πρόβλημα είναι ότι οι χωρητικότητες, ενδο-ηλεκτροδίων, που σχετίζονται με το πλέγμα και την κάθοδο της $V2$, έχουν αυξανόμενη επίδραση στο κέρδος του συστήματος, το οποίο θα μειώνεται όσο η συχνότητα θα αυξάνεται. Επίσης κάνει την εμφάνιση του ένα πάνω όριο στο κέρδος λόγω του φαινομένου διακλαδισμένης εμπέδησης ανόδου της $V1$. Μια πέντοδος μικρού σήματος που έχει μεγαλύτερη τιμή στην R_a , θα ήταν καλύτερη σαν λυχνία εισόδου.

Ο ενισχυτής γειωμένου πλέγματος βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε ενισχυτές ραδιοσυχνοτήτων, επειδή το γειωμένο πλέον πλέγμα δρα σαν ηλεκτροστατικό διαχωριστικό πλέγμα μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του κυκλώματος, αποφεύγοντας τα προβλήματα λόγω ανεπιθύμητων σημάτων ανάδρασης διαμέσου των ηλεκτροστατικών χωρητικότητων.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι τα χαρακτηριστικά μεταφοράς εισόδου –εξόδου είναι πολύ γραμμικά όταν χρησιμοποιείται με μια πηγή ρεύματος η οποιαδήποτε άλλη πηγή σήματος, υπάρχει σχεδόν απόλυτη απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων εισόδου εξόδου. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι η εμπέδηση εισόδου όπως φαίνεται από την κάθοδο είναι πολύ μικρή ($\approx 1/g_m$). Επιπλέον πρόβλημα είναι το ρεύμα διαρροής μεταξύ του νήματος θέρμανσης και της καθόδου θα εισάγει θόρυβο στο σήμα εισόδου. Εφόσον το ρεύμα ανόδου και καθόδου είναι το ίδιο η τάση εξόδου δίνεται από $V_{out} = I_a R1 = I_k R1$. Αν η αντίσταση εισόδου είναι αρκετά μικρότερη της αντίστασης της πηγής, ώστε να μπορεί να αμεληθεί τότε το κέρδος είναι $A_v = V_{out} / V_{in} = R1/R_s$

Με άλλα λόγια το στάδιο αυτό θα δώσει ενίσχυση μεγαλύτερη της μονάδας αν η εμπέδηση της πηγής είναι μικρότερη της εμπέδησης του φορτίου. Η εμπέδηση ανόδου R_p είναι πολύ μεγάλη και περίπου ίση με $\mu * R_{in}$

Η διάταξη Cascode αυτή έχει όλα τα πλεονεκτήματα, όπως γραμμικότητα και δυνατότητα λειτουργίας σαν απομονωτής, που σχετίζονται με τη διάταξη του γειωμένου πλέγματος με το επιπλέον πλεονέκτημα ότι η εμπέδηση εισόδου είναι πολύ ίδια με αυτή της διάταξης γειωμένης καθόδου (κοινής καθόδου).

Ένα μειονέκτημα είναι ότι χρειάζεται επιπρόσθετη τροφοδοσία για την $V2$, και πρέπει να αφήνει στην άνοδο της $V1$ αρκετά περιθώρια για να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Η αντίσταση ανόδου της $V2$ είναι πολύ μεγάλη επειδή το ρεύμα ανόδου πρέπει να είναι το ίδιο με το ρεύμα καθόδου και αυτό είναι το ρεύμα ανόδου της $V1$. Λόγω της παθητικής λειτουργίας της $V2$, τα χαρακτηριστικά της διάταξης καθορίζονται από την $V1$. Η διάταξη cascode εφαρμόζεται όταν απαιτείται ελαχιστοποίηση του θορύβου από την γραμμή τροφοδοσία του νήματος θέρμανσης στην κάθοδο του $V2$.

Το Διαφορικό Ζευγάρι (long tailed –pair) αποτελείται από δύο πανομοιότυπες λυχνίες (συνήθως στην ίδια συσκευασία) περνώντας το ρεύμα στην κάθοδο μέσω μιας πηγής ρεύματος, με τις καθόδους τους συνδεδεμένες οδηγώντας η κάθε μία την ίδια αντίσταση φορτίου που τροφοδοτείται με την ίδια υψηλή τάση. Η διάταξη αυτή ανάλογα από πιο ακροδέκτη τροφοδοτείται και από πού λαμβάνουμε την έξοδο ή αν κάποιο από τα πλέγματα είναι γειωμένο, έχει και διάφορες χρήσιμες εφαρμογές. Ο διαφορικός ενισχυτής έχει δύο εισόδους και ενισχύει την διαφορά τους, παρέχοντας δύο σήματα εξόδου διαφορετικής φάσης.

Μπορεί να κατασκευαστεί με τον ενισχυτή κοινής καθόδου ή με τον cascode. Ο ενισχυτής αντιδρά μόνο στη διαφορά των σημάτων εισόδου Εφαρμόζοντας το ίδιο σήμα και στα δύο πλέγματα είναι γνωστό σαν σήμα κοινής διαμόρφωσης (common mode) και μια σημαντική παράμετρος του είναι η απόρριψη κοινού σήματος και δίνεται από

$$CMMR \sim \mu R_k$$

Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική, αφού το κύκλωμα μπορεί να απορρίψει το θόρυβο από την τροφοδοσία ή από την είσοδο. Γενικά όμως επειδή από κατασκευής οι λυχνίες δεν είναι ταιριασμένες (πολύ δύσκολα βρίσκεις ίδιες λυχνίες στις διπλοτριόδους) τότε η απόρριψη κοινού σήματος δίνεται από

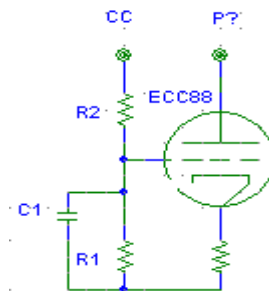
$$CMMR = \mu_1 \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2)$$

Στην περίπτωση αυτή θα αναλύσουμε το long-tailed pair, όπου στην κάθοδο του συνδέεται μία αντίσταση και στο πλέγμα της μίας λυχνίας εφαρμόζεται μια τάση αναφοράς ενώ στο πλέγμα της άλλης το σήμα. Η διάταξη αυτή θα έπρεπε να ονομαστεί συζευγμένος ενισχυτής καθόδου. Η λυχνία ενίσχυσης λειτουργεί σαν γειωμένου πλέγματος στάδιο, με το πλέγμα σταθερό σε μια δοσμένη τάση, από τροφοδοτικό χαμηλής εμπέδησης και με το σήμα εισόδου να εισάγεται στην κάθοδο.

Το κέρδος στην διάταξη αυτή είναι το μισό από αυτό στο κύκλωμα της κοινής καθόδου. αυτό συμβαίνει γιατί και οι δύο λυχνίες δρουν σαν ακόλουθοι καθόδου σε σχέση με την αντίσταση 'ουράς' R_1 . Ενώ η V_1 προσπαθεί να μεταφέρει το σήμα εισόδου από το πλέγμα στην κάθοδο, η V_2 προσπαθεί να κρατήσει την καθόδου σε σταθερή τάση. Αν και οι δύο είναι πανομοιότυπες στα χαρακτηριστικά τους θα έχουν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή σήματος τάσης στην κάθοδο, με πλάτος το μισό αυτού της εισόδου (πλέγμα V_1)

Αν η αντίσταση στην κάθοδο είναι πολύ μεγάλη και οι δύο αντιστάσεις στις ανόδους έχουν ίδια τιμή, τα σήματα που αναπτύσσονται στις ανόδους θα έχουν σχεδόν το ίδιο πλάτος αλλά θα βρίσκονται σε διαφορετική φάση. Αυτό του επιτρέπει να λειτουργεί σαν διαχωριστής φάσης (phase splitter) πριν από το push pull στάδιο εξόδου – προσφέροντας μια πολύ καλύτερη λειτουργία σε σχέση με ένα μετασχηματιστή με μεσαία λήψη. Επίσης επιτρέπει στην είσοδο να συνδέεται απευθείας με το πλέγμα, εφόσον η τάση αναφοράς στο πλέγμα της άλλης λυχνίας μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να δώσει την σωστή ισορροπία μεταξύ των δύο λυχνιών.

Ο ενισχυτής κοινής καθόδου, με κατάλληλες ρυθμίσεις, μπορεί να μας δώσει αυξημένη τιμή της εσωτερικής αντίστασης ανόδου της λυχνίας. Εκμεταλλευόμενοι αυτό το γεγονός, κατασκευάζεται πολύ απλά μια σταθερή πηγή ρεύματος. Η διάταξη στο σχήμα 8 παρουσιάζει μια τέτοια πηγή με την λυχνία ECC88.

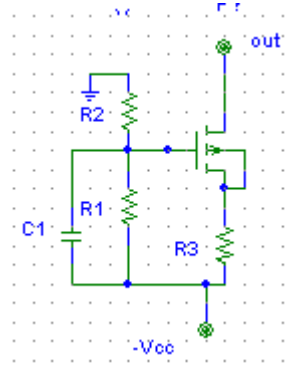


Σχήμα 8 Πηγή Ρεύματος

Αν έχουμε γνωστή την τάση ανόδου στην οποία το ρεύμα θα είναι σταθερό και ίσο με κάποια τιμή, μπορούμε να υπολογίσουμε τα άλλα στοιχεία και με βάση τις χαρακτηριστικές της λυχνίας. Επιλέγοντας από τις χαρακτηριστικές το σημείο λειτουργίας (V_a, I_a, V_g) ώστε να υπάρχει καλή γραμμικότητα, που είναι σημαντική γιατί, στο πλήρες κύκλωμα η τάση πιθανότατα να διαμορφώνεται από το ηχητικό σήμα που θα λαμβάνει. Αν δεν υπάρχει γραμμικότητα, αυτό παρέχει αστάθεια στην τιμή της r_a , που είναι μέρος της εμπέδησης εξόδου της πηγής. Αν η τάση εξόδου ποικίλει με το εφαρμοζόμενο σήμα, ενώ χρησιμοποιείται από μια άλλη λυχνία σαν ενεργό φορτίο, θα προκαλέσει παραμόρφωση σε αυτή. Γνωρίζοντας λοιπόν την V_a , μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση στην κάθοδο. Γνωρίζοντας και την V_g , υπολογίζουμε τις άλλες δύο αντιστάσεις. Η αντίσταση κοιτάζοντας την άνοδο είναι $R_{sink} = r_a + R_k(1 + \mu)$ ($R_k = R_3$). Η τιμή αυτή της εμπέδησης πέφτει καθώς αυξάνεται η συχνότητα, επειδή η έξοδος

συνδέεται παράλληλα με την C_{out} και την C_{a-g} , προκαλώντας πώση στο κέρδος (C_{out} είναι η χωρητικότητα από την άνοδο προς όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια εκτός του πλέγματος).

Οι πηγές ρεύματος στον προς κατασκευή ενισχυτή πραγματοποιήθηκαν με MOSfet και λόγω μεγέθους αλλά και λόγω ευχρηστίας. Διότι για τους ημιαγωγούς χρειάστηκε μόνο μία αρνητική μικρή τάση της τάξεως των $-18V$. Η κατασκευή της πηγής ρεύματος με τους ημιαγωγούς φαίνεται στο σχήμα 22. Οι ρυθμίσεις γίνονται όπως και στις λυχνίες, μόνο που εδώ συμβουλευόμαστε τις χαρακτηριστικές του στοιχείου.



Σχήμα 9 Πηγή ρεύματος με Mosfet

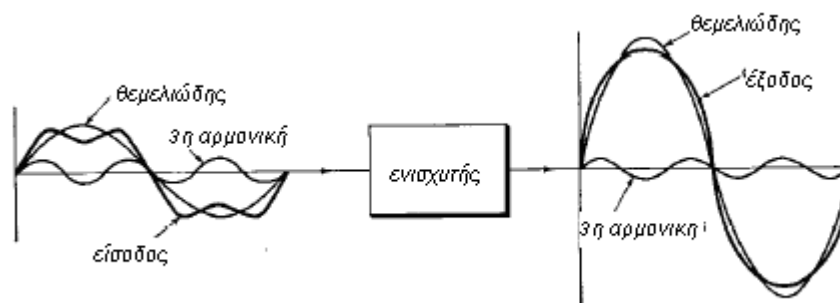
Για όλες τις παραπάνω διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλου τύπου λυχνίες (κυρίως πέντοδοι) κατά των ίδιο τρόπο. Πολλές φορές μάλιστα φέρουν και πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

2.4 Παραμόρφωση στους ενισχυτές

Η κυματομορφή κάθε σήματος εξαρτάται από την περιεκτικότητα της σε αρμονικές- το σχετικό πλάτος και τη φάση των στοιχείων της αρμονικής συχνότητας του σήματος. Οποιαδήποτε συσκευή αλλάζει το σχετικό πλάτος και τη φάση αυτών των αρμονικών παραμορφώνει το σήμα. Αντίστροφα οποιαδήποτε συσκευή προσθέτει νέες συχνότητες που δεν υπάρχουν στο αρχικό σήμα το παραμορφώνει. Οι ενισχυτές προκαλούν και τις δύο παραμορφώσεις.

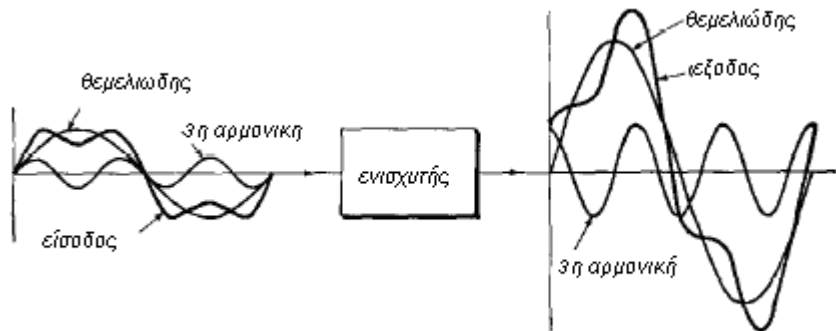
Οι τύποι της παραμόρφωσης είναι:

Παραμόρφωση συχνοτήτων. Συμβαίνει όταν κάποια στοιχεία από ένα πολύπλοκο σήμα ενισχύονται περισσότερο από άλλα. Το αποτέλεσμα είναι στην έξοδο να έχουμε ένα εντελώς διαφορετικό σήμα.



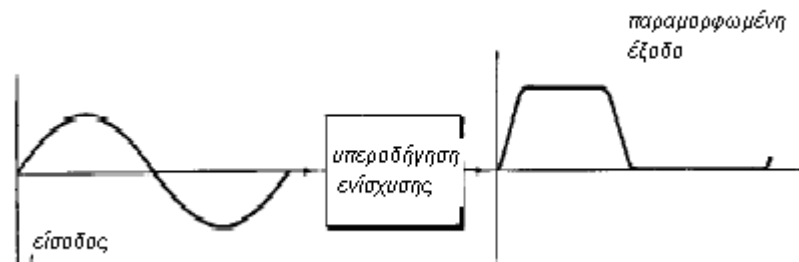
Σχήμα 10 Παραμόρφωση συχνοτήτων

Παραμόρφωση Φάσης. Όταν το σήμα περνάει από ένα ενισχυτή και καθυστερεί, γνωστή ως καθυστέρηση φάσης ή παραμόρφωση, η οποία μεταβάλλεται με την συχνότητα. Προκαλείται κυρίως από την αντίδραση των κυκλωμάτων ζεύξης μεταξύ των σταδίων ενός ενισχυτή



Σχήμα 11 Παραμόρφωση Φάσης

Παραμόρφωση Πλάτους. Αν ένας ενισχυτής λειτουργεί σε μία μη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής του στοιχείου του, μια αλλαγή στην στιγμιαία τάση του πλέγματος επιφέρει αλλαγή στο ρεύμα που ρέει στο στοιχείο η οποία δεν είναι σε αναλογία. Με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του πλάτους. Αρμονικά στοιχεία παράγονται στον ενισχυτή και παρουσιάζονται στο σήμα εξόδου.



Σχήμα12 Παραμόρφωση Πλάτους

Ενδοδιαμορφωμένη Παραμόρφωση. Ένα πολύπλοκο σήμα περιέχει τουλάχιστον δύο στοιχεία συχνοτήτων, αν ένα τέτοιο σήμα εφαρμοστεί σε ένα ενισχυτή που λειτουργεί στη μη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής, τότε παρουσιάζεται ενδοδιαμόρφωση. Στη ενδοδιαμόρφωση προκαλούνται αρμονικά στοιχεία στην κυματομορφή εξόδου, άθροισμα και διαφορά συχνοτήτων σε κάθε ζευγάρι των στοιχείων της κυματομορφής

3.1 Εισαγωγή

Η αποστολή των ενισχυτών ισχύος είναι η παροχή καθορισμένου κέρδους σε ένα επεξεργασμένο σήμα και η απόδοση ισχύος σε ένα φορτίο, όπως είναι τα ηχεία. Αυτό πρέπει να γίνει χωρίς να νοθεύεται το αρχικό σήμα με θόρυβο, ταλαντώσεις ή παραμορφώσεις ενώ οδηγεί ένα πλήθος από φορτία. Επιπλέον πρέπει να αντέχει στην κακομεταχείριση, όπως τα ανοιχτοκυκλώματα και τα βραχυκυκλώματα.

Ο καθοριστικός παράγοντας είναι το στάδιο εξόδου. Η επιλογή του καθορίζει την τοπολογία και των υπόλοιπων σταδίων του ενισχυτή. Σκόπιμο λοιπόν είναι να ξεκινήσει κάποιος από αυτό το στάδιο για την έρευνα και την σχεδίαση.

3.2 Στάδιο εξόδου

Οι λυχνίες είναι υψηλής εμπέδησης συσκευές και μπορούν να διαχειρίζονται volt πολλών εκατοντάδων, αλλά αποδίδουν μόνο μερικά μιλιαμπέρ ρεύματος. Εν αντιθέσει τα, τυπικά των 4-8Ω, ηχεία απαιτούν μερικές δεκάδες βολτ και αμπέρ για να λειτουργήσουν. Η προφανής λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η παρεμβολή μεταξύ εξόδου και φορτίου ενός μετασχηματιστή.

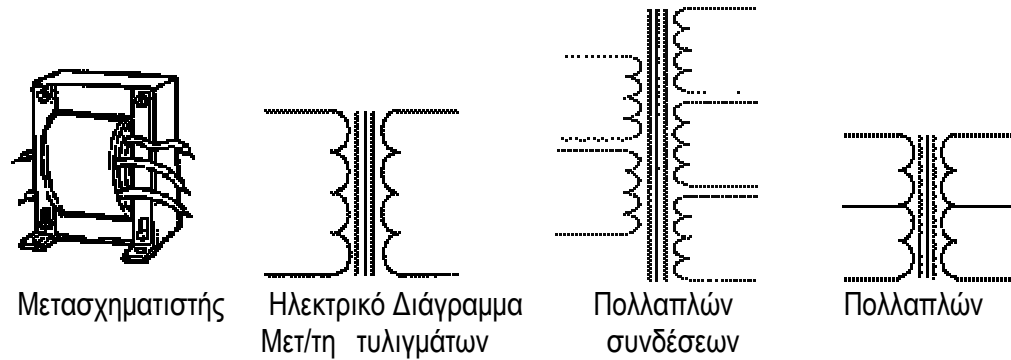
Δυστυχώς εδώ ξεκινάνε τα προβλήματα, γιατί ο μετασχηματιστής δεν είναι ένα ιδανικό στοιχείο και η ποιότητα του ενισχυτή με λυχνίες περιορίζεται από την ποιότητα του μετασχηματιστή. Παρά ταύτα, ο μετασχηματιστής είναι μια καλή μηχανική επιλογή για την σύζευξη του σταδίου εξόδου με το φορτίο.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των σταδίων εξόδου θα πρέπει να αναφερθούμε για λίγο στην λειτουργία και στα προβλήματα των μετασχηματιστών.

3.2.1 Μετασχηματιστές Ήχου.

Μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που επιτρέπει σε ένα AC σήμα να παράγει ένα άλλο εναλλασσόμενο σήμα εξόδου, χωρίς η είσοδος και η έξοδος να συνδέονται φυσικά. Αυτό επιτυγχάνεται έχοντας δύο ή περισσότερα πηνία μονωμένου σύρματος γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα. Όταν ένα σήμα περνάει από το τύλιγμα εισόδου (πρωτεύον), ένα σχετικό σήμα εξόδου παρουσιάζεται στο δεύτερο τύλιγμα (δευτερεύον), μέσω ενός φαινομένου που ονομάζεται επαγωγική σύζευξη. Αλλάζοντας τον αριθμό των στρωφών του σύρματος σε κάθε τύλιγμα, ο μετασχηματιστής μπορεί να κατασκευαστεί έχοντας συγκεκριμένες τιμές εμπέδησης εισόδου, εξόδου. Η αναλογία μεταξύ εμπέδησης εισόδου /εξόδου παρέχει ένα κέρδος ή απώλεια του επιπέδου του σήματος. Λόγω της δυνατότητας του μετασχηματιστή να

Λειτουργεί σε δύο κατευθύνσεις, όταν έχει σαν είσοδο το ένα τύλιγμα και το σήμα ενισχύεται θετικά, αν το σήμα εφαρμοστεί στο άλλο τύλιγμα τότε το σήμα ενισχύεται αρνητικά. Οι μετασχηματιστές μπορούν να κατασκευαστούν με ένα οι περισσότερα δευτερεύοντα ή πρωτεύοντα τυλίγματα. Επίσης ένα τύλιγμα μπορεί να έχει μία ή περισσότερες ηλεκτρικές επαφές. Οι πολλαπλές επαφές προσφέρουν διαφορετικές τιμές εμπέδησης κατά μήκος του σύρματος και διαφορετικό κέρδος. Μερικοί τύποι μετασχηματιστών παρουσιάζονται στο σχήμα 1



Σχήμα 1. Τύποι Μετασχηματιστών

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μετασχηματιστών ήχου με καθένα από αυτούς να έχει πολλαπλές δυνατότητες:

Αύξησης / μείωσης μετασχηματιστής

Συμβατότητα σήματος ή ταίριασμα

Συμβατότητα εμπέδησης ή ταίριασμα

Μοναδιαίος 1:1

Αποκοπή DC

Αποκοπή παρεμβολών ραδιοφωνικών συχνοτήτων

Απομόνωσης συσκευών

Αύξησης /Μείωσης Μετασχηματιστές

Σε αυτούς τους μετασχηματιστές, το πρωτεύον και το δευτερεύον έχουν διαφορετικό αριθμό τυλιγμάτων. Επομένως και διαφορετική εμπέδηση. Η διαφορετική εμπέδηση προκαλεί την αλλαγή στο επίπεδο του σήματος, καθώς κινείται διαμέσου του μετασχηματιστή. Αν το δευτερεύον έχει μεγαλύτερη εμπέδηση από το πρωτεύον τότε, το επίπεδο του σήματος στο δευτερεύον θα είναι μια μεγαλύτερη τάση.

$$\text{Αναλογία τυλιγμάτων} = \frac{\text{Δευτερεύοντος}}{\text{Πρωτεύοντος}} = \sqrt{\frac{\text{Εμπέδηση δευτερεύοντος}}{\text{Εμπέδηση Πρωτεύοντος}}}$$

$$\text{Απώλειες Φορτίου} = 20 \cdot \log \frac{\text{Εμπέδηση φορτίου}}{\text{Εμπέδηση φορτίου} + \text{Εμπέδηση πηγής}}$$

$$\text{Κέρδος μετασχηματιστή} = 20 \cdot \log \sqrt{\frac{\text{Εμπέδηση δευτερεύοντος}}{\text{Εμπέδηση Πρωτεύοντος}}}$$

Μοναδιαίος Μετασχηματιστής

Συχνά αναφέρεται και σαν απομονωτής, έχει τον ίδιο αριθμό τυλιγμάτων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον. Χρησιμοποιείται για να αποκόπτει τα συνεχή σήματα ή τις ραδιοφωνικές παρεμβολές, μιας

και δεν προκαλεί καμιά αλλαγή στο σήμα. Επίσης μπορεί να απομονώσει ηλεκτρικά διαφορετικά κομμάτια από ένα εξάρτημα. Αυτό μπορεί να λύσει προβλήματα θορύβου , απομονώνοντας τις γειώσεις διαφορετικών συσκευών. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν παροχή πολλαπλών εξόδων από μία είσοδο μικροφώνου, χρησιμοποιώντας πολλαπλά δευτερεύοντα τυλίγματα .

3.2.1.α Ατέλειες του μετασχηματιστή

Η αναφορά στο μετασχηματιστή , φέρνει την ιδέα μιας ιδανικής συμπεριφοράς. Δυστυχώς όμως , από το πρωτεύον του μετασχηματιστή εξόδου περνάει ένα συνεχές μαγνητικό ρεύμα ($I_{\eta\rho\epsilon\mu\acute{\iota}\alpha}$, I_q). Για να μην φτάσει σε κορεσμό ο πυρήνας, προκαλώντας διαταραχή περιπτώσεων αρμονικών, θα πρέπει να έχει μεγάλο πυρήνα. Άλλη μέθοδος για να αποφύγουμε τον κορεσμό είναι η μείωση του αριθμού των τυλιγμάτων στο πρωτεύον , ελαττώνοντας έτσι το μαγνητικό φαινόμενο του ρεύματος ηρεμίας .

Συνήθως χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι , με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μετασχηματιστή. Επειδή όμως ο μετασχηματιστής είναι μεγάλος έχει πολύ μεγάλες παρασιτικές χωρητικότητες. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται με αυτό τον τρόπο είναι μεγάλοι και ακριβοί και έχουν μειωμένη απόδοση στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες.

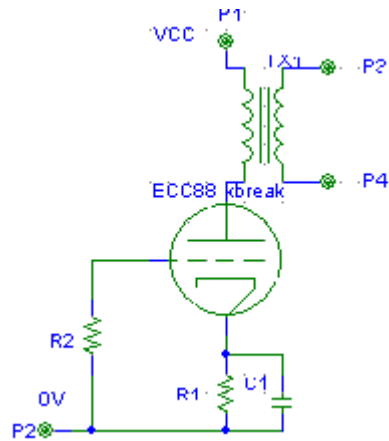
Οι καμπύλες υστέρησης του μετασχηματιστή μπορούν να θεωρηθούν σαν την χαρακτηριστική μεταφοράς, δείχνοντας την σχέση μεταξύ V_{in} και V_{out} . Αν δεν υπήρχε συνεχές ρεύμα, τότε το ac σήμα θα ταλαντώνονταν συμμετρικά γύρω από την αρχή των αξόνων. Στα μικρά σήματα παρατηρείται ένα γόνατο στην χαρακτηριστική γύρω από την αρχή των αξόνων όπου η κλίση της καμπύλης ελαττώνεται. Η αιτία για αυτό το γόνατο είναι ότι τα ανεξάρτητα μαγνητικά πεδία που σχηματίζονται από τον πυρήνα αντιστρέφουν την πολικότητα του μαγνητισμού τους. Περνώντας το ρεύμα ηρεμίας δια μέσου του μετασχηματιστή, αποφεύγουμε αυτή την περιοχή διασταύρωσης και η χαρακτηριστική μεταφοράς είναι πιο γραμμική. Για αυτό ίσως υπάρχουν αναφορές για την εξαιρετική συμπεριφορά στη μεσαία περιοχή στην τάξη A των single-ended ενισχυτών .

Αν και ο μετασχηματιστής έχει μικρή επαγωγή στο πρωτεύον, που περιορίζει την καλή συμπεριφορά στα μπάσα, ο πυρήνας δεν φτάνει σε κορεσμό στις χαμηλές συχνότητες, εφόσον πρέπει να είναι υπερμεγέθης για να εξομαλύνει το ρεύμα ηρεμίας. Εξαιτίας αυτού, η επαγωγή σε πλήρη ac ισχύ εξόδου είναι περίπου η ίδια σε μηδενικό ac σήμα εξόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε σημαντικά καλή ποιότητα στα μπάσα εφόσον δεν αλλάζει με το επίπεδο. Το πρόβλημα όμως είναι με τις υψηλές συχνότητες όπου η απόδοση είναι φτωχή.

Τα στάδια εξόδου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες σε αυτά με μετασχηματιστή εξόδου και σε αυτά χωρίς μετασχηματιστή εξόδου τα γνωστά OTL (output transformerless) για την αποφυγή όλων των παραπάνω προβλημάτων.

3.2.2 Στάδιο εξόδου με μετασχηματιστή

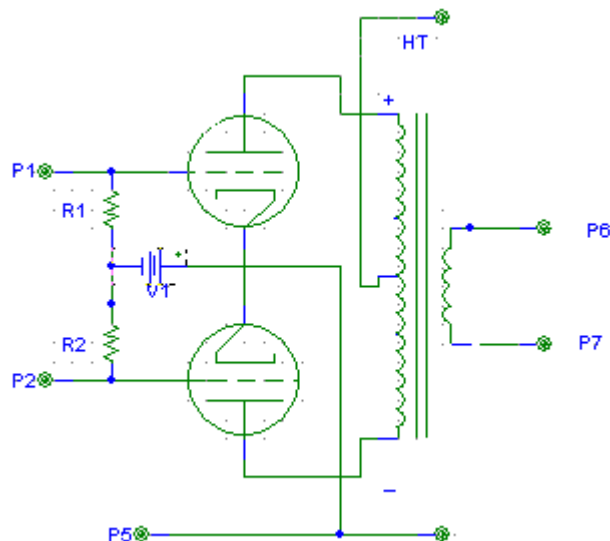
Ένα τυπικό στάδιο εξόδου είναι ο ενισχυτής κοινής καθόδου με τρίοδο και πόλωση καθόδου. Συνήθως στα στάδια τάσεως, χρησιμοποιούμε μια γραμμή φορτίου ώστε να επιλέξουμε την τιμή του φορτίου ανόδου και γενικά το βέλτιστο για την γραμμικότητα και όχι για την κυμάτωση. Τώρα όμως μας ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της ισχύος. Σημειώνεται λοιπόν το σημείο λειτουργίας στην διασταύρωση μεταξύ μέγιστης τάσης ανόδου και μέγιστης ισχύος απωλειών. Για μέγιστη ισχύ συνήθως το βέλτιστο φορτίο είναι το διπλάσιο της αντίστασης ανόδου $2x r_a$ που λαμβάνουμε από την γραφική. Δυστυχώς όμως τα ηχεία δεν είναι μια απλή αντίσταση, και ο μετασχηματιστής δεν είναι τέλειος άρα το φορτίο που βλέπει η λυχνία είναι μια πολύπλοκη και μεταβλητή εμπέδηση



Σχήμα 2 Single-ended στάδιο με μετασχηματιστή

Το γεγονός ότι κάποιο τμήμα της γραμμής φορτίου περνάει μέσα από την καμπύλη απωλειών, δεν μας απασχολεί, διότι το στάδιο οδηγείται μόνο από ac, έτσι μόνο κατά τον μισό κύκλο του σήματος ξεπερνάει την καμπύλη κατά το άλλο μισό είναι κατά πολύ μικρότερη, άρα η θερμική αδράνεια θα δώσει τον μέσο όρο των θερμικών απωλειών της εξόδου.

Άλλο ένα τυπικό στάδιο εξόδου που λειτουργεί όμως σε τάξη B είναι ο ενισχυτής push-pull με μετασχηματιστή εξόδου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.



Σχήμα 3 Push-pull

Υποθέτοντας, ότι τροφοδοτούμε την μία λυχνία με το σήμα εισόδου και την άλλη με το αναστροφο σήμα. Όταν το σήμα εισόδου είναι θετικό, άγει η πρώτη λυχνία, ενώ αποκόπτεται όταν είναι αρνητικό κάνοντας την δεύτερη λυχνία να άγει. Έχει επιτευχθεί λοιπόν πάντοτε να λειτουργεί μια λυχνία.

Αντιστρέφοντας ένα από τα σήματα εξόδου και προσθέτοντας τα, έχουμε ξαναδημιουργήσει το αρχικό σήμα εισόδου. Ο απλούστερος τρόπος για να επιτευχθεί η άθροιση τυλίγοντας και τα δύο πρωτεύοντα στον ίδιο πυρήνα. Η αντιστροφή του σήματος πραγματοποιείται από την αντιστροφή της σύνδεσης του ενός τυλίγματος και σημειώνεται στο σχήμα 3 με το σύμβολο + και -. Η διάταξη αυτή είναι ο μοναδικός τρόπος προσέγγισης της γραμμικότητας ενός ενισχυτή σε τάξη B.

Η ανατομία του σήματος, ομολογεί το συνεχές «ξαναράφιμο» του σήματος, καθιστώντας το μη ιδανικό. Η καθαρή τάξη B χρησιμοποιείται πολύ σπάνια λόγω της παραμόρφωσης διασταύρωσης που παράγεται στην περιοχή διασταύρωσης, όπου η μία λυχνία εναλλάσσεται (σε λειτουργία) με την άλλη. Πρακτικά κάποιο ρεύμα ηρεμίας επιτρέπεται να ρέει, σε μια προσπάθεια ομαλοποίησης του μεταβατικού σταδίου, καταλήγοντας στην λειτουργία της τάξης AB. Αν και είναι θεωρητικά εφικτό να

καθοριστεί ένα βέλτιστο σημείο λειτουργίας για τους ενισχυτές της τάξεως AB, οι λυχνίες δεν λειτουργούν γραμμικά στην περιοχή αποκοπής .

Εξαιτίας των παραπάνω αλλά και εξαιτίας των φυσικών διαφορών των λυχνιών , το ιδανικό σημείο λειτουργίας δεν μπορεί να καθοριστεί και η συμπεριφορά περιορισμένης παραμόρφωσης είναι φτωχή . Το στάδιο push –pull μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ενισχυτές τάξεως A, δίνοντας τους επιπλέον πλεονεκτήματα. Λόγω της αντιστροφής του τυλίγματος η μαγνητική ροή που προκαλείται από τα ρεύματα ηρεμίας της ανόδου,ακυρώνεται. Αυτό σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής έχει να αντιμετωπίσει μόνο το ρεύμα του σήματος, άρα μπορεί να είναι μικρότερος για μια αναμενόμενη ισχύ.

Εφόσον ο πυρήνας είναι μικρός είναι σημαντικό το ρεύμα ηρεμίας της ανόδου σε κάθε λυχνία να είναι ίδιο, αλλιώς η μαγνήτιση του πυρήνα από dc ρεύμα θα προκαλέσει παραμόρφωση περιπτών αρμονικών. Αυτό μπορεί να γίνει έχοντας ένα ρυθμιστή dc ισορροπίας στο κύκλωμα πόλωσης ή χρησιμοποιώντας λυχνίες με ταιριασμένα ρεύματα ανόδου .

Αν ο πυρήνας πρέπει να είναι μόνιμα μαγνητισμένος , θα χρειαστεί απομαγνήτιση, αλλιώς θα παραχθεί παραμόρφωση. Αυτό μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας ένα σημαντικό μεγάλο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα υπερφορτώνοντας τον θετικά και αρνητικά και μετά μηδενίζοντας το πεδίο για περίπου 10 δευτερόλεπτα.

Ένα χρήσιμο αποτέλεσμα της μείωσης του μεγέθους του μετασχηματιστή είναι η βελτίωση στην απόκριση υψηλών συχνοτήτων λόγω της μείωσης των παρασιτικών χωρητικότητων . Όχι μόνο ακυρώνει τα ρεύματα ηρεμίας των ανόδων αλλά και τα σήματα που προέρχονται από την τροφοδοσία ,εφόσον είναι σε φάση σε κάθε τύλιγμα, καθιστώντας το στάδιο πιο ανεκτικό στο βόμβο και στο θόρυβο από τα τροφοδοτικά των υψηλών τάσεων. Επιπροσθέτως , η διαταραχή ζυγών αρμονικών , που προκαλείται από άνισο κέρδος των αρνητικών και θετικών μισών του κύκλου ,ακυρώνονται , ενώ η παραμόρφωση των περιπτών αρμονικών αθροίζεται.

Είναι χρήσιμο που οι τρίοδοι παράγουν περιπτών αρμονικών διαταραχή, αλλά οι πέντοδοι παράγουν κυρίως ζυγές αρμονικές και για αυτό απαιτούν αρκετή αρνητική ανάδραση (>20dB) για την μείωση της διαταραχής σε ανεκτικά επίπεδα.

Είναι υπό συζήτηση για το αν είναι ανεπιθύμητη η ακύρωση των περιπτών αρμονικών στις πέντοδους , εφόσον οι ζυγές σαν σκοπό έχουν να καλύψουν τις περιπτές αρμονικές. Η ακύρωση αυτή μπορεί να προκληθεί μόνο αν τροφοδοτήσουμε και τα δύο τυλίγματα με πανομοιότυπα σήματα.

3.2.3 Στάδιο εξόδου χωρίς μετασχηματιστή

Σχεδόν όλες οι διατάξεις των σταδίων εξόδου που έχουν εμφανιστεί , είχαν σαν σκοπό την εξομάλυνση ή την απαλοιφή των αρνητικών επιδράσεων του μετασχηματιστή εξόδου. Μερικές από αυτές έχουν απαλλαχθεί από αυτόν και είναι γνωστές σαν OTL διατάξεις ή ενισχυτές Futterman .

Οδηγώντας χαμηλής εμπέδησης φορτία άμεσα δεν είναι φυσικό για τις λυχνίες, επομένως χρειάζονται κάποιες ριζοσπαστικές προσεγγίσεις. Σε αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιούνται κυρίως λυχνίες που δεν έχουν κατασκευαστεί για ήχο. Καποιες από αυτές οι 6080, 6082 διπλοτρίοδος,6336/AB ,7236, 7241,6C33C, η PL519 πέντοδος , 6AS7G και άλλες.

ΕΜΠΕΔΗΣΗ ΕΞΟΔΟΥ

Το μεγαλύτερο πρόβλημα σχεδιάζοντας ένα OTL είναι η τιμή της εμπέδησης : οι λυχνίες έχουν σχεδιαστεί να έχουν υψηλή τάση ,μικρά ρεύματα ενώ τα σύγχρονα ηχεία απαιτούν υψηλά ρεύματα και σχετικά χαμηλές τάσεις. Η αντίσταση ανόδου μιας λυχνίας , τυπικά μεγάλη, περιορίζει την ισχύ που μπορεί να αποδώσει σε μια δοσμένη τάση.

Η διαθέσιμη ισχύς δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την εμπέδηση ανόδου ,αλλά επηρεάζεται από την τάξη λειτουργίας του ενισχυτή. Ακόμα και οι καλύτερες λυχνίες έχουνε αρκετά μεγαλύτερη αντίσταση εξόδου σε σχέση με το φορτίο. Εάν πχ η εμπέδηση της λυχνίας είναι 20Ω, σε ένα ηχείο 4Ω θα έχει

απόδοση (4/24) 16%. Μάλλον αναποτελεσματικό! Λογικές τιμές ισχύς μπορούν και πάλι να εξασφαλιστούν αλλά πρέπει να τροφοδοτήσουμε τον ενισχυτή με υψηλότερη τάση από την μέγιστη(peak) τάση εξόδου, με περισσότερες απώλειες φυσικά.

Εφόσον δεν μπορούμε να αλλάξουμε τα χαρακτηριστικά μιας λυχνίας ,πρέπει να αλλάξουμε τον τρόπο με τον οποίο μια λυχνία διατάσσεται και οδηγείται σε ένα κύκλωμα ενισχυτή. Αυτό μπορεί να έχει δραματική επίδραση πάνω στην εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή , που μας αποκαλύπτει πόσο αποτελεσματική τροφοδοσία έχουμε φτιάξει. Όσο μικρότερη είναι η εμπέδηση εξόδου τόσο καλύτερο το τροφοδοτικό και ο ενισχυτής θα μπορεί να ελέγξει της μη γραμμικότητες και τις διαταραχές .

Οι κοινές τοπολογίες για ενισχυτές χωρίς μετασχηματιστή εξόδου , έχουν κάποιες πολύ σημαντικές διαφορές στις χαρακτηριστικές της εμπέδησης εξόδου ,που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη στην επιλογή της τοπολογίας.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι συζητήσεις για την εμπέδηση εξόδου πρέπει να γίνονται σε επίπεδο μικρού- σήματος. Στην πραγματικότητα , οι χαρακτηριστικές μιας λυχνίας είναι μη γραμμικές , και η εμπέδηση ανόδου, που εξάγεται από ένα σημείο λειτουργίας που επιλέγεται στις χαρακτηριστικές ρεύματος – τάσης, αλλάζει δραστικά σε ένα ευρύ πεδίο. Όπως και να έχει τα αποτελέσματα της ανάλυσης μικρού σήματος είναι αποτελεσματικά, αν βρούμε ένα σημείο που ελαχιστοποιεί την εμπέδηση εξόδου , θα δουλεύει σταθερά πολύ καλύτερα στο πεδίο του μεγάλου σήματος. Με άλλα λόγια , πιθανόν, να ακούγεται καλύτερα σε πραγματικές συνθήκες.

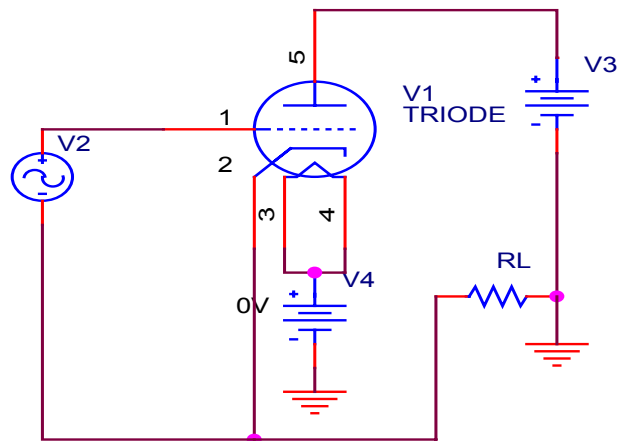
Η αλλαγή στην τιμή της εμπέδησης ανόδου είναι άλλος ένας λόγος για την εύρεση της χαμηλότερης τιμής της εμπέδησης εξόδου. Αν η εμπέδηση εξόδου είναι υψηλή σε σχέση με το φορτίο και αλλάζει σε σχέση με το ρεύμα , θα δημιουργηθεί μια σημαντική ποσότητα περιττών αρμονικών διαταραχών.

ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ

Ο πρώτος εμπορικός ενισχυτής OTL ήταν του Στέφενς και μπορούσε να τροφοδοτήσει μόνο τα δικά του ειδικά σχεδιασμένα ηχεία των 500 Ω. Με την εισαγωγή των διπλοτριόδων,6AS7G ,αυτό άρχισε να γίνεται εφικτό. Η εμπέδηση ανόδου καθορίστηκε στα 280Ω ανά τμήμα λυχνίας. Αν λοιπόν συνδέονταν αρκετές λυχνίες παράλληλες δεν θα ήταν δύσκολο να φτάσει τα 16Ω , των ηχείων εκείνης της περιόδου.

3.2.3.α Ακόλουθος καθόδου OTL

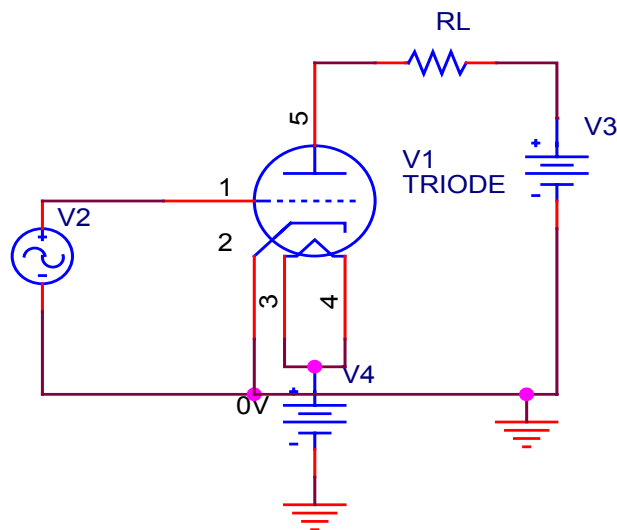
Για να πάρουμε την χαμηλότερη δυνατή εμπέδηση για μια λυχνία, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διαμόρφωση ακόλουθου καθόδου. Αυτή η διάταξη μας δίνει εμπέδηση εξόδου $R_p/(1+ \mu)$,όπου η R_p είναι η εσωτερική αντίσταση της ανόδου και το μ είναι το κέρδος της λυχνίας . Έχουν κατασκευαστεί ενισχυτές με μία λυχνία εξόδου, αν και έχουν πολύ περιορισμένη ισχύ και πρέπει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με το dc ρεύμα στο φορτίο. Για να γίνει αυτό πρέπει τα ηχεία να τοποθετηθούν παράλληλα με ένα μεγάλο πηνίο το οποίο θα αποτρέψει το dc ρεύμα. Η διάταξη είναι ακόμα OTL δεν υπάρχει μετασχηματιστής μεταξύ της λυχνίας ισχύος και του φορτίου και καμία από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του μετασχηματιστή εξόδου. τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της διάταξης χωρίς μετασχηματιστή εξόδου είναι ,η απλοϊφή του σύρματος του μετασχηματιστή και η άμεση σύνδεση του ηχείων με τις λυχνίες χωρίς να παρεμβάλλονται αλλά στοιχεία.Όμως το πηνίο θα ελαττώσει την απόδοση στα μπάσα σε αυτή την τοπολογία. Ο ενισχυτής πρέπει να λειτουργεί σε τάξη A.



Σχήμα 4 Ακόλουθος καθόδου

3.2.3.β Κοινής Καθόδου OTL

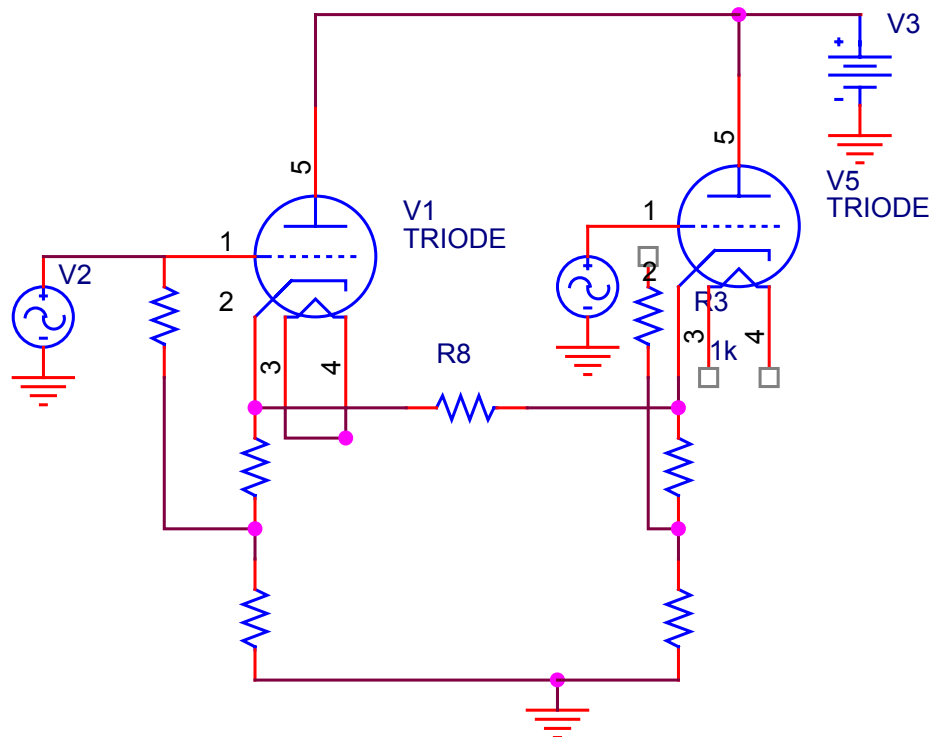
Στην διάταξη αυτή η κάθοδος είναι γειωμένη και το φορτίο συνδέεται στην άνοδο. Η εμπέδηση εξόδου εδώ είναι πολύ μεγαλύτερη και ίση με την εμπέδηση ανόδου. Η διαμόρφωση καθόδου προτιμάτε από κάποιους για την κατασκευή single ended .Και σε αυτή την περίπτωση το dc ρεύμα μπορεί να εξαλειφθεί με ένα πηνίο παράλληλα στα ηχεία . Λειτουργεί μόνο σε τάξη A. Άρα τα μειονεκτήματα είναι πολλά .



Σχήμα 5 Κοινής Καθόδου

3.2.3.γ Push-pull Ακόλουθος Καθόδου

Το 1951 ο Φλέτσερ και ο Κουκ κατασκεύασαν ένα ισορροπημένο στάδιο εξόδου το ονομαζόμενο push-pull. Χρησιμοποιώντας 8 6AS7G παράγονται 6.32W σε 16 Ω. Αυτή η προσέγγιση έχει δύο μειονεκτήματα, η λειτουργία της περιορίζεται στην τάξη A και η εμπέδηση εξόδου ήταν αρκετά υψηλή $2R_p/(1+\mu)$. Σύμφωνα με την προηγούμενη διάταξη θα έπρεπε να είχαμε εμπέδηση εξόδου $R_p/(2+2\mu)$ χρησιμοποιώντας δύο λυχνίες παράλληλα. Η push-pull διάταξη όμως μας δίνει τέσσερις φορές μεγαλύτερη εμπέδηση και αυτό επειδή οι δύο λυχνίες συνδέονται σε σειρά και όχι παράλληλα.

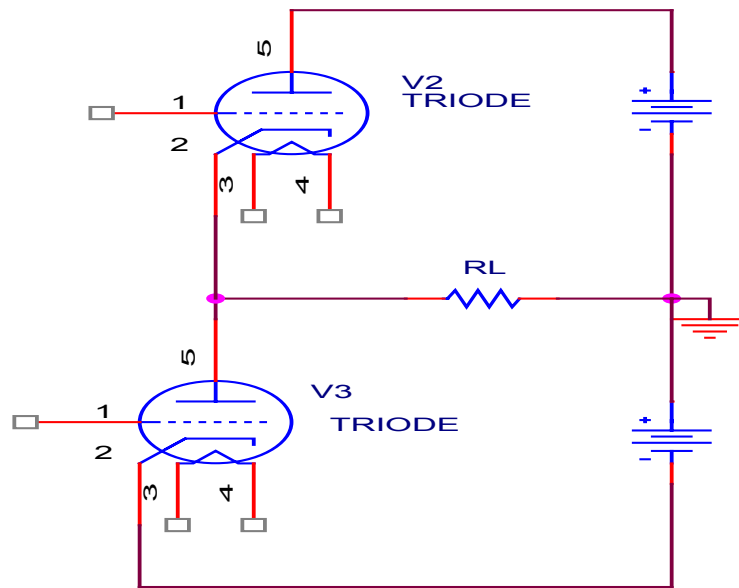


Σχήμα 6 Push –pull ακόλουθος καθόδου

3.2.3.δ Single-ended push -pull

Το 1951 οι Πιτερσον και Σινκλερ πρότειναν την διάταξη SEPP που επρόκειτο να γίνει η κλασική OTL τοπολογία. Το κύκλωμα είναι απλό και προσαρμόζεται στις τάξεις AB και AB2, επιτρέποντας περισσότερη ισχύ. Το μειονέκτημα της είναι η ανισορροπία της.

Το φορτίο εμφανίζεται στην κάθοδο στην μία λυχνία και στην άνοδο στην άλλη. Αν εφαρμόσουμε ένα συμβατικό στάδιο οδήγησης push- pull με αναφορά στη γη, οι επάνω λυχνίες θα συμπεριφέρονται σαν ακόλουθοι καθόδου ενώ οι κάτω σαν κοινής καθόδου. Αυτό προκαλεί ανισορροπία στο κέρδος και στην εμπέδηση εξόδου μεταξύ του πάνω και του κάτω σταδίου. Για να επιτευχθεί σωστή push –pull λειτουργία, οι επάνω και οι κάτω πρέπει να οδηγηθούν με ίσα αλλά αντίθετης φάσης σήματα, αλλά η παρουσία του φορτίου στο κύκλωμα εισόδου της των επάνω λυχνιών δυσκολεύει την πρακτική εφαρμογή. Η λύση στο πρόβλημα δίνεται από τα στοιχεία στερεάς κατάστασης και η ανισορροπία ξεπερνιέται χρησιμοποιώντας στοιχείο p- καναλιού.



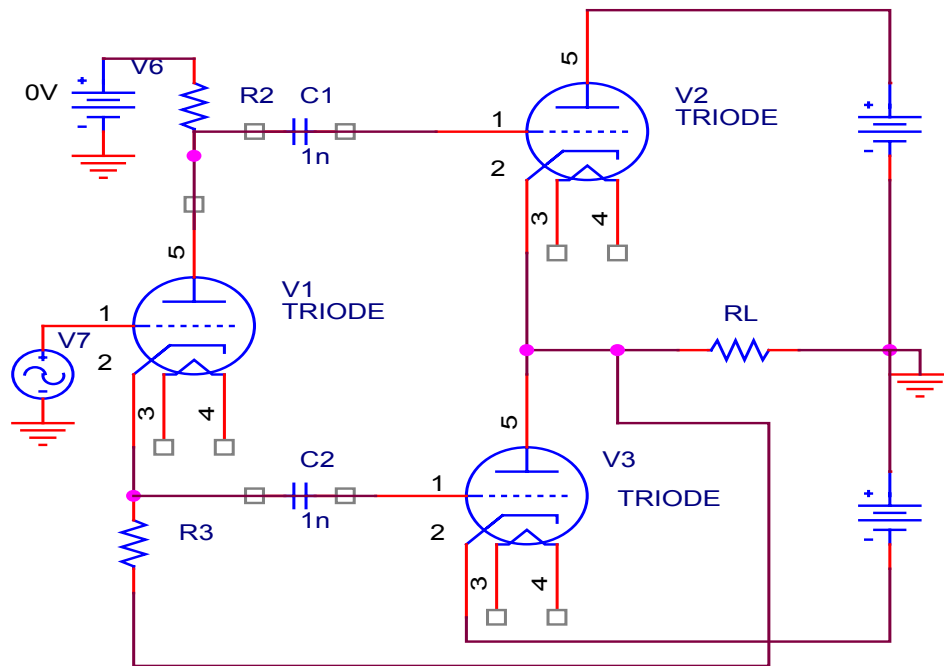
Σχήμα 7 SEPP

3.2.3.ε Τοπολογία Futterman's

Το 1954 ο Νεοϋορκέζος Ιούλιος Φατερμαν δημοσίευσε την πιο διάσημη λύση στο πρόβλημα για μια ισορροπημένη οδήγηση του SEPP. Πρότεινε να επιστρέφει, η αντίσταση καθόδου του (split-load) αναστροφέα φάσης, στη γη μέσω του φορτίου, αντί να γειώνεται απευθείας. Αυτός ο διακανονισμός έχει σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή, μεταξύ πλέγματος και ανόδου και στις δύο λυχνίες, ίσων αλλά αντίθετης φάσης σημάτων οδήγησης. Υπέθεσε ότι αυτή η οδήγηση, θα έκανε τις λυχνίες εξόδου να λειτουργούν σαν ακόλουθοι καθόδου. Δυστυχώς όμως τα πράγματα δεν είναι έτσι. Η 100% θετική ανάδραση που εφαρμόζεται από τον αναστροφέα στην τάση εξόδου, ακυρώνει δραστικά την 100% αρνητική ανάδραση από το φορτίο, που παράγει ο ακόλουθος καθόδου αρχικά.

Αυτό που ουσιαστικά κατάφερε ήταν να μετατρέψει την πάνω λυχνία σε κοινή καθόδου ενισχυτή, ταιριάζοντας την με την κάτω, χάνοντας το πλεονέκτημα του ακόλουθου καθόδου. Δίνοντας τελική εμπέδηση εξόδου $R_p/2$.

Η τοπολογία του Φατερμαν προτιμάτε στην Αμερική. Στην Ιαπωνία όμως, χρησιμοποιούν κυρίως την λύση του Χιρόσι Αμενιγια με χρήση ενός αναστροφέα συζευγμένης καθόδου (cathode-coupled). Αν και αυτός ο αναστροφέας προκαλεί μείωση της εμπέδησης οδήγησης και αποδίδει διπλάσια δυνατότητα κυμάτωση του σήματος, δυστυχώς έχει σαν αποτέλεσμα στη λειτουργία και των δύο λυχνιών σαν ενισχυτές κοινής καθόδου.



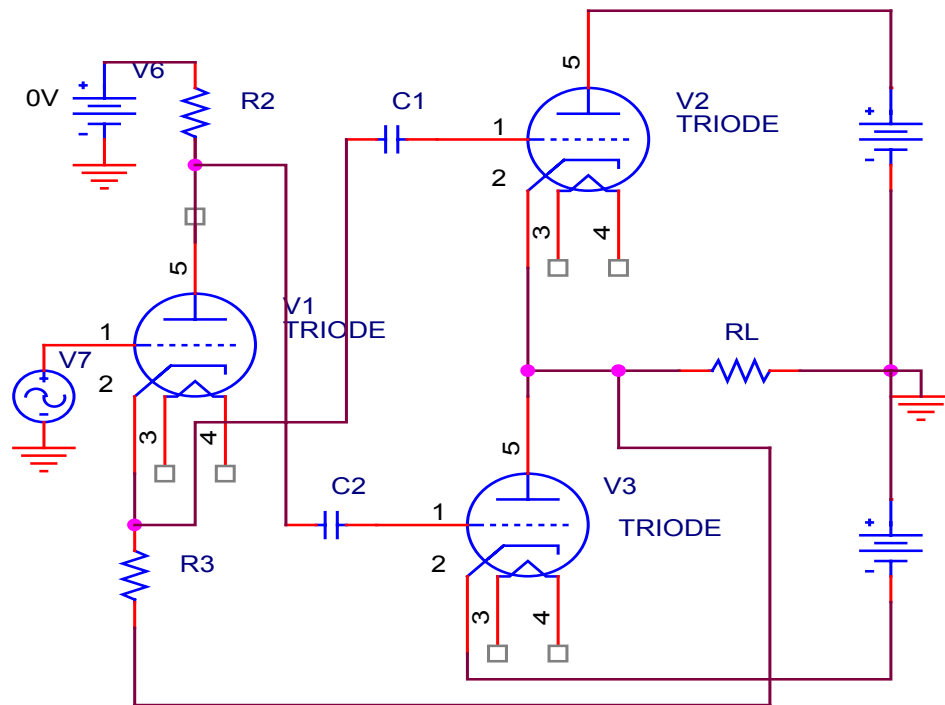
Σχήμα 8 FUTTERMAN OTL

Η διαμόρφωση αυτή όπως και άλλες λύσεις οδήγησης του SEPP, επιτρέπουν την λειτουργία σε τάξη AB. Με προσοχή μπορεί να λειτουργήσει σε τάξη AB2, εφόσον το κύκλωμα οδήγησης ,δεν είναι τέλεια ισορροπημένο, και το ρεύμα στο πλέγμα θα προκαλέσει ασυμμετρία μεταξύ των πάνω και των κάτω λυχνιών με αποτέλεσμα διαταραχή.

3.2.3.στ Παραλλαγή στη Futterman's

Η λύση στο πρόβλημα της τοπολογίας του Futterman δίνεται από μια παραλλαγή της. Αν ανταλλάξουμε τα σήματα οδήγησης ,του πλέγματος, από τον αναστροφέα το κύκλωμα συμπεριφέρεται πλέον σαν ένα ζευγάρι ακόλουθων καθόδου και η εμπέδηση εξόδου φτάνει την θεωρητική τιμή των $R_p / 2(1+\mu)$. Δηλαδή είναι τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή του Futterman.

Φυσική η χαμηλότερη εμπέδηση δεν σημαίνει ότι μπορείς να παρέχει τέσσερις φορές περισσότερη ισχύ! Η δυνατότητα διαχείρισης της ισχύος είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, εφόσον η ισχύς καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά ανόδου της λυχνίας. Αυτά τα κυκλώματα χρειάζονται διαφορετικές αξιώσεις για να ανεβάσουν την ισχύ. Επίσης η χαμηλή εμπέδηση μπορεί να επιτευχθεί μόνο από λυχνίες μεγάλου κέρδους. Αν είναι επιθυμητή η λειτουργία καθαρής τριόδου και χρησιμοποιούνταν μια συνηθισμένου κέρδους λυχνία τότε, η εμπέδηση εξόδου θα ήταν τρις φορές μικρότερη.

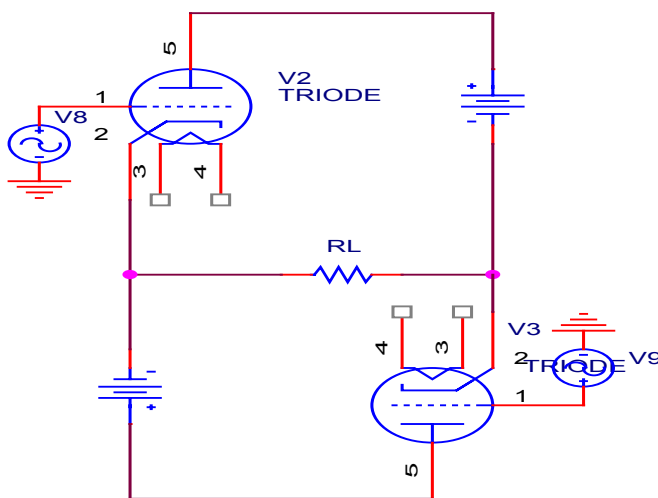


Σχήμα 9 Futterman Παραλλαγή

3.2.3.ζ Κυκλωτρο

Με μια απλή διαμόρφωση στο στάδιο εξόδου, τελειώνουν όλα τα προβλήματα με τα σήματα οδήγησης και το πώς να εξισορροπήσουμε την έξοδο. Αν στο φορτίο και στις δύο τροφοδοσίες επιτραπεί να κινούνται (float) χωρίς αναφορά στη γη και αν η θέση της κάτω τροφοδοσίας και λυχνίας εναλλάξουν, η εσωτερική ανισορροπία του SEPP εξαλείφεται. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιήθηκε το 1955 αλλά δεν είχε εφαρμοστεί σε OTL μέχρι τα τέλη του 1980.

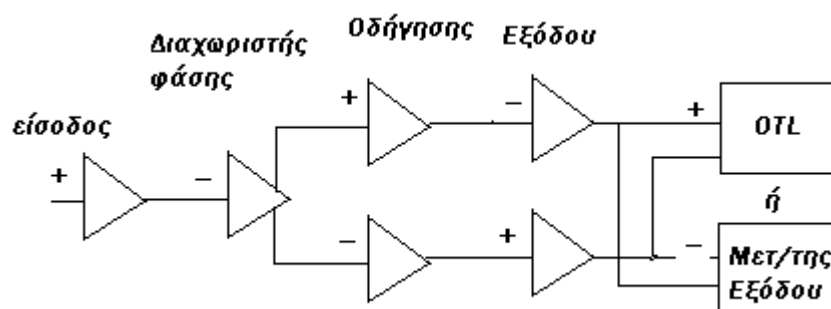
Με το κύκλωτρο κάθε λυχνία συμπεριφέρεται με ακριβώς τον ίδιο τρόπο. Τα μισά σήμα κατά μήκος του φορτίου εμφανίζεται στην κάθοδο της κάθε λυχνίας, έχοντας συμπεριφορά μερικώς ακόλουθου καθόδου. Η εμπέδηση εξόδου είναι λίγο μεγαλύτερη από το θεωρητικά αναμενόμενο $R_p/(2+\mu)$. Ένα συμβατικό push-pull στάδιο οδήγησης επιτυγχάνει τέλεια ισορροπία με το κύκλωτρο, χωρίς κυκλωματικά κόλπα και χωρίς ανάδραση, σε λυχνίες υψηλού κέρδους, στο στάδιο οδήγησης.



Σχήμα 10.Κύκλωτρο

Τα πλεονεκτήματα της διάταξης είναι αρκετά. Και οι δύο κάθοδοι βρίσκονται σε μηδενικό δυναμικό και μπορούν να πολωθούν με μια κοινή αρνητική τάση. Στη SEPP απαιτούνται δύο τάσεις, μία με αναφορά στη γη και την άλλη με αρνητική τάση αναφοράς. Επίσης λόγω της ασυμμετρικής διάταξης των λυχνιών εξόδου με αναφορά τις τάσεις της γραμμής, κάθε κυμάτωση, σήμα ή γραμμή τάσης που φέρει στιγμιαία σήματα τροφοδοτείται απευθείας στο πλέγμα του κυκλώματος των κάτω λυχνιών δια μέσου της καθόδου, όπου ενισχύεται με το σήμα εισόδου. Οι επάνω λυχνίες είναι ελεύθερες από αυτό μιας και η γραμμή τάσης διερευνά την άνοδο και δεν διαμορφώνει την τάση καθόδου – πλέγματος. Το αποτέλεσμα είναι σημαντικός θόρυβος και σήμα εξαρτώμενο από την dc μετατόπιση σε μεγαλύτερα επίπεδα σήματος. Ο μόνος τρόπος για να αποτραπεί είναι να εξασφαλιστεί σταθεροποίηση και από τις δύο γραμμές τροφοδοσίας. Ενώ με την διάταξη του κύκλωτου, η κυμάτωση και ο θόρυβος στις γραμμές τάσεις δεν επηρεάζουν την πόλωση του πλέγματος. Οποιαδήποτε μετατροπή στις γραμμές επηρεάζει μόνο την άνοδο των λυχνιών, μιας και η έξοδος αντιδράει μόνο σε διαφορικές εισόδους, η κυμάτωση και τα στιγμιαία σήματα στις γραμμές (θόρυβος) και όλες αυτές οι διαταραχές είναι σήματα κοινής μεταβολής. Τα πλεονεκτήματα συνολικά είναι, χαμηλή εμπέδηση, ισορροπημένη λειτουργία και υψηλό δείκτη απόρριψης κοινού σήματος. Το σημαντικότερο είναι ότι πραγματοποιείται χωρίς αρνητική ανάδραση.

Έχοντας πλέον δει τα προβλήματα του σταδίου εξόδου πρέπει να σχεδιαστεί το υπόλοιπο κύκλωμα ώστε να μπορέσει να το υποστηρίξει. Στο διάγραμμα 11, φαίνεται η αλληλουχία των σταδίων από τα οποία αποτελείται ένας ενισχυτής ισχύος.



Σχήμα 11. Συνολική διάταξη ενός ενισχυτή ισχύος

Εκτός από το στάδιο εξόδου και πιθανόν το στάδιο οδήγησης, τα υπόλοιπα στάδια θα φορτωθούν με κάποιες αναμενόμενες αντιστάσεις φορτία. Άρα είναι επιθυμητό, ο σχεδιασμός τους να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή, για να μην αλλοιωθεί η συμπεριφορά ολόκληρου του ενισχυτή.

3.3 Στάδιο Οδήγησης

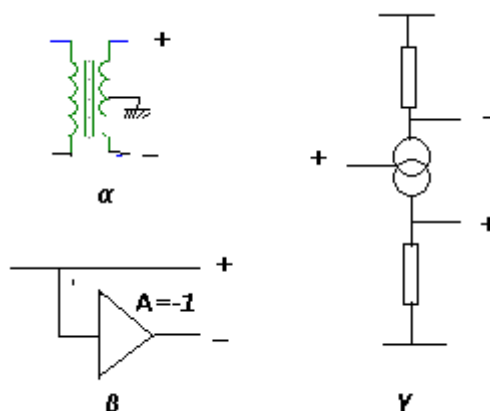
Εκτός και αν ο ενισχυτής είναι πολύ μικρής ισχύος, θα απαιτεί ένα αφοσιωμένο στάδιο οδήγησης. Πρέπει να είναι πολύ καλής γραμμικότητας, χαμηλής εμπέδησης εξόδου και καλής κυμάτωσης του σήματος εξόδου. Το διαφορικό ζευγάρι είναι ιδανικό για αυτό το σκοπό. Εφόσον η εμπέδηση εξόδου Ζout είναι περίπου ίση με την αντίσταση ανόδου r_a , οι λυχνίες με υψηλό συντελεστή κέρδους μ , που τείνουν να έχουν και υψηλή αντίσταση εξόδου, δεν προτιμώνται για αυτό το στάδιο. Σε ένα καλά σχεδιασμένο ενισχυτή, το στάδιο εξόδου πρέπει να είναι ο οριακός παράγοντας, άρα οφείλεται να σχεδιάζεται το στάδιο οδήγησης με δυνατότητα περιθωρίου υπερφόρτωσης 6dB. Αυτή η απαίτηση, αποκλείει την χρήση της ECC88. Στην πραγματικότητα υπάρχει μόνο μία που μπορεί να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις και

είναι η 6SN7 ή στην μοντέρνα της έκδοση την ECC82. Μια εμπέδηση εξόδου μικρότερη από 10K επιτυγχάνεται εύκολα και με καλή γραμμικότητα και κυμάτωση τάσης.

Περιστασιακά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα μικρότερη τιμή εμπέδησης. Η E182CC μπορεί να παρέχει εμπέδηση εξόδου μικρότερη από 5K , ή μπορεί να συμπληρωθεί το στάδιο με απευθείας ζεύξης με ένα στάδιο ακόλουθου καθόδου.

3.3.1 Διαχωριστής φάσης

Το στάδιο οδήγησης πάντα ακολουθεί από ή συνδυάζεται με ,ένα διαχωριστή φάσης. Ο διαχωριστής είναι καθοριστικός κατά την σχεδίαση ενός ενισχυτή push-pull. Ο διαχωριστής απαιτείται για να αντιστρέψει ένα μονό σήμα σε δύο σήματα ίσου πλάτους και αντίθετης πολικότητας. Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις τρόποι για να επιτευχθεί αυτό.



Σχήμα 12 Θεμελιώδεις βάσεις όλων των διαχωριστών φάσης

Χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή μεσαίας λήψης , παίρνουμε στην έξοδο ίσα και αντίθετα σήματα . Φυσικά θα υπάρχουν τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι μετασχηματιστές για αυτό και δεν είναι ευρείας χρήσης η διάταξη αυτή.

Χρησιμοποιώντας δύο εξόδους , μία είναι το αρχικό σήμα ενώ η άλλη λαμβάνεται από ένα αναστροφέα.

Με τη χρήση ενός απλού ενισχυτή που ελέγχει τη ροή του ρεύματος σε δύο αντιστάσεις ,η μία συνδέεται με τη γη και άλλη με υψηλή τάση. Η αύξηση του ρεύματος προκαλεί αύξηση στην πτώση τάσης των αντιστάσεων , άρα κάθε στιγμή η απόλυτη τάση στην μία αυξάνεται ενώ στην άλλη ελαττώνεται.

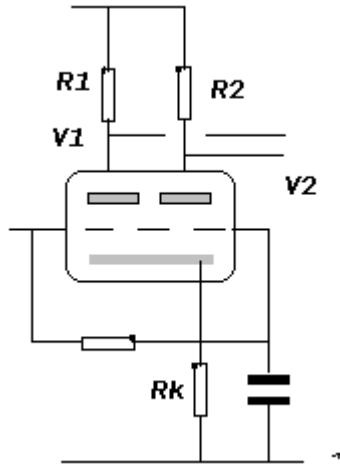
Όλοι ο διαχωριστές που εφαρμόζουν την δεύτερη μέθοδο βασίζονται στο διαφορικό ζευγάρι ενώ η τρίτη μέθοδος είναι η βάση για τον concertina διαχωριστή.

3.3.1.α Το Διαφορικό Ζευγάρι σαν Διαχωριστής Φάσης

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα κλασσικό διαφορικό ζευγάρι αλλά εάν η αντίσταση στην κάθοδο δεν είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την $\gg RL$, η συμπεριφορά δεν θα είναι ιδανική. Υπάρχουν τρεις τρόποι για να αντιμετωπιστεί αυτό.

Το διαφορικό ζευγάρι με πηγή ρεύματος. Χρησιμοποιώντας μια τρίοδο σαν πηγή ρεύματος , επιτυγχάνουμε αντίσταση 'ουράς' περίπου 2M , πιθανόν να επιτυγχάνεται κάτι καλύτερο με ημιαγωγούς άλλα πάλι θα περιοριζόμαστε από τις παρασιτικές χωρητικότητες. Η συμπεριφορά είναι οριακή αν η RL είναι 100K. Δεδομένου ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί πολύ μεγάλη αντίσταση 'ουράς' αντί για πηγή ρεύματος , τοποθετείται μια αντίσταση στην κάθοδο, 22K έως 82K σαν ουρά και υπολογίζεται το σφάλμα που αναμένεται και γίνεται μια προσπάθεια διόρθωσης. Ο V2 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας γειωμένου πλέγματος ενισχυτής , που τροφοδοτείται από την κάθοδο της V1. Η δουλειά της πρώτης λυχνίας σαν

ακόλουθος καθόδου είναι να τροφοδοτεί την δεύτερη με αποτέλεσμα την φαινομενική απώλεια κέρδους στην δεύτερη λυχνία ,εφόσον σαν ακόλουθος καθόδου έχει κέρδος $\mu < 1$. Με επιθεώρηση μπορούμε να δούμε ότι απαιτείται $2U_{gk}$ για την οδήγηση του σταδίου , έτσι το κέρδος από το σύνθετο στάδιο είναι σε κάθε έξοδο είναι το μισό από αυτό που θα αναμενόταν από μία ανεξάρτητη λυχνία . Αν η έξοδος βρισκόταν σε ισορροπία τότε $V_1=V_2 \Rightarrow i_1R_1=i_2R_2$ (1)



Σχήμα 13. Συνδεδεμένης καθόδου διαχωριστής φάσης

Το κέρδος στην δεύτερη είναι A_2 έτσι :

$$U_{gk} = U_2 / A_2 \quad (2)$$

Το σήμα ρεύματος που ρέει στην αντίσταση καθόδου θα είναι το ρεύμα εξόδου (εκτός -ισορροπίας).

$$U_{gk} = (i_1 - i_2) R \quad (3)$$

Το σήμα στην έξοδο του V_2 θα είναι $(i_1 - i_2)R_{kA_2} = i_2R_2 \Rightarrow i_1R_{kA_2} = i_2(R_2 + R_{kA_2})$

Αντικαθιστώντας στην (1)

$$R_2/R_1 = R_2 / (R_{kA_2}) + 1$$

Αυτό δείχνει ότι εκτός και εάν το κέρδος ή η αντίσταση ουράς R_k είναι άπειρη το κλάσμα των φορτίων ανόδου πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να μείνει εξισορροπημένο. Να σημειωθεί ότι το κέρδος A_2 δεν είναι όλο του σταδίου αλλά του ανεξάρτητου V_2 . Το V_2 λειτουργεί με μηδενική ανάδραση και η είσοδος της παρέχεται από την κάθοδο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αρνητική ανάδραση για να μειωθεί το κέρδος της V_1 στο μισό της αναμενόμενης τιμής , αυξάνοντας την αντίσταση ανόδου. Οποιαδήποτε αλλαγή στην r_a , προκαλεί αλλαγή στην αντίσταση εξόδου. Το κέρδος της τριόδου είναι :

$$A = \mu R_L / (R_L + r_a) \quad (4)$$

Αλλά το νέο κέρδος είναι το μισό ακριβώς , άρα

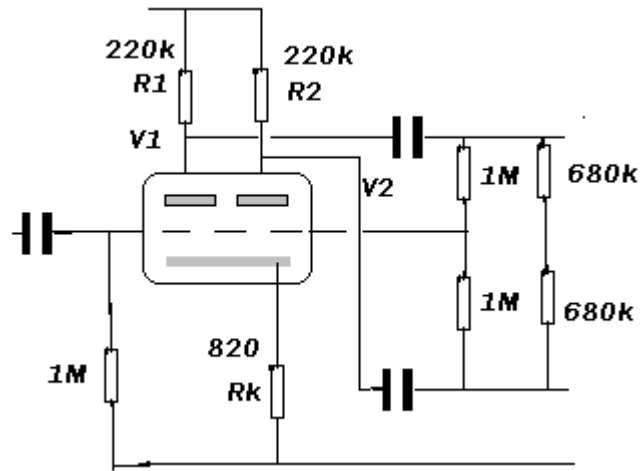
$$\mu R_1 / (R_1 + r_a) = 2 \mu R_L / (R_L + r_a') \quad (5)$$

Από τις 4 και 5 έχουμε $r_a' = R_1 + 2r_a$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η ίδια αντίσταση παρουσιάζεται κοιτάζοντας από την άνοδο στην V_2 , προσθέτοντας λοιπόν μια αντίσταση σε σειρά με την V_2 για να εξισώσει τις εμπέδησης εξόδου.

Σε αυτή την περίπτωση δεν γίνεται καμία προσπάθεια για να επιτευχθεί μια μεγάλη τιμή στην αντίσταση ουράς και βασίζονται στην ανάδραση για να υπάρχει ισορροπία. Ο διαχωριστής αυτός είναι γνωστός σαν see-saw phase splitter. Τυπικά το σχέδιο αυτό χρησιμοποιεί λυχνίες με υψηλό μ , όπως η ECC83. Παρατηρώντας το σχέδιο 14 βλέπουμε ότι η V_2 είναι ένας αναστροφέας μοναδιαίους κέρδους, του οποίου το κέρδος καθορίζεται από τις R_1, R_2 . Εφόσον το κέρδος ανοιχτού βρόχου της δεύτερης λυχνίας δεν

είναι άπειρο , αυτές οι τιμές πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να δώσουν κέρδος $- 1$. Αυτός ο υπολογισμός θα είναι πιο περίπλοκος , από το γεγονός ότι η R2 επιδρά στην γραμμή φορτίου και στο κέρδος ανοιχτού βρόχου του σταδίου. Η V2 επίσης απαιτεί μια αντίσταση να εξισορροπήσει τις αντιστάσεις εξόδου, εφόσον η αντίσταση εξόδου έχει ελαττωθεί από την αρνητική ανάδραση. Όταν γίνουν όλες αυτές οι διορθώσεις η ισορροπία του διαχωριστή είναι καλή, εφόσον η λειτουργία της V2 έχει σταθεροποιηθεί από την ανάδραση.



Σχήμα 14. See-saw phase splitter

3.3.1.β Concertina- Διαχωριστής Φάσης

Στον προηγούμενο διαχωριστή μπορεί να παρέχονταν κέρδος , αλλά αυτό εξασφαλίζεται ενάντια στην ισορροπία της εξόδου που εξαρτάται από τα ανεξάρτητα χαρακτηριστικά των λυχνιών.

Ο διαχωριστής concertina δεν παρέχει κέρδος , η ισορροπία στην έξοδο καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από παθητικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά των λυχνιών σχεδόν δεν εμφανίζονται σαν στοιχείο. Η αρχή λειτουργίας είναι πολύ απλή.

Η διαμόρφωση της τάσεως του πλέγματος προκαλεί ένα σήμα ρεύματος να ρέει στην λυχνία , τα φορτία στην άνοδο και στην κάθοδο είναι ίσα και το ρεύμα που ρέει σε αυτά είναι το ίδιο, άρα και τα σήματα που παράγονται κατά μήκος τους πρέπει να είναι ίσα. Έτσι έχουμε απόλυτη ισορροπία.

Πολλοί μελετητές τονίζουν ότι οι αντιστάσεις εξόδου δεν είναι ίσες και αυτό , όταν το στάδιο οδηγεί αληθινό φορτίο , εκθέτει την ισορροπία του. Κοιτώντας μέσα στην κάθοδο η αντίσταση που βλέπουμε είναι η Rk παράλληλα με την r_k (το μονοπάτι της ανόδου προς τη γη).

$r_k = (R_a + r_a) / (\mu + 1)$. Αντικαθιστώντας η αντίσταση εξόδου είναι

$$r_{out} = \frac{R_k \frac{R_a + r_a}{\mu + 1}}{R_k + \frac{R_a + r_a}{\mu + 1}} \quad (6)$$

Για $R_a = R_k = R_L$ η σχέση απλοποιείται :

$$r_{out} = \frac{R_L (R_L + r_a)}{R_L (\mu + 2) + r_a} \quad (\text{καθόδου}) \quad (7)$$

Κοιτώντας προς την άνοδο , βλέπουμε την Ra στην υψηλή τάση παράλληλα με το μονοπάτι της καθόδου προς τη γη : $r_a' = RL(\mu+1) + r_a$. Η απλοποιημένη έκφραση είναι:

$$r_{out} = \frac{R_L^2(\mu+1) + R_L r_a}{R_L(\mu+2) + r_a} \quad (\text{ανόδου}) \quad (8)$$

Επιθεωρώντας την σχέση 8 , φαίνεται ότι οι μέρη που σχετίζονται με το μ είναι τα μόνα σημαντικά μέρη , και ότι αν το μ είναι αρκετά μεγάλο τότε $(\mu+1) \approx (\mu+2)$, ώστε η εμπέδηση εξόδου να ελαττώνεται στην τιμή της RL. Η εμπέδηση εξόδου της καθόδου πρέπει να υπολογιστεί εξολοκλήρου, αλλά γενικά δίνει μια τιμή γύρω στο 1KΩ . Επειδή ο λόγος των αντιστάσεων εξόδου είναι τόσο μεγάλος είναι απαραίτητο να εξισωθούν , αλλιώς θα προκαλέσουν φτωχή HF ισορροπία. Σαν πρώτη προσέγγιση μια αντίσταση στην κάθοδο ίση με την αντίσταση φορτίου είναι απαραίτητη.

Η αντίσταση εξόδου του σταδίου είναι $\sim RL$, η τυπική τιμή της είναι στα 22KΩ ώστε να κρατάει την αντίσταση εξόδου σχετικά χαμηλά. Αυτό σημαίνει ότι λυχνίες με υψηλό μ , όπως η ECC83, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτό το στάδιο. Αντιθέτως η ECC82 είναι καλή και η ECC88 ακόμα καλύτερη. Το κέρδος ανόδου προς την κάθοδο μπορεί να υπολογιστεί $A = (\mu RL) / (RL + r_a')$ αντικαθιστώντας την r_a' με την παραπάνω σχέση. Όμως δεν θεωρείται μεγάλο το σφάλμα αν απλοποιηθεί στην σχέση $A = \mu / (\mu+1)$ Λόγω αυτού του πολύ μικρού κέρδους, η χωρητικότητα Μίλερ είναι πολύ μικρή και το στάδιο έχει ευρύ πεδίο Είναι σύνηθες την πόλωση του σταδίου να την καθορίζει το στάδιο εισόδου με απευθείας σύνδεση της ανόδου του, με το πλέγμα του διαχωριστή, χωρίς την χρήση πυκνωτή ζεύξης.

3.3.1.γ Αναστροφείας Φάσης Schmitt

Θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά σε αυτόν τον τύπο του διαχωριστή ,για τον μόνο λόγο ότι χρησιμοποιείται στο τελικό σχέδιο αυτής της κατασκευής. Το θεμελιώδες σχέδιο του φαίνεται στο σχήμα 15. Η διάταξη αυτή είναι πολύ εύχρηστη στις διπλοτρίοδους και μπορεί να επιτευχθεί πλήρη ισορροπία στην διάταξη με κατάλληλη αναλογία στις αντιστάσεις ανόδου .

Ανήκει στην ομάδα των αντιστροφένων με ζεύξη καθόδου με αντίσταση(resistor cathode coupled). Απαιτεί δύο τριόδους με συνδεδεμένες τις καθόδους τους σε μια κοινή αντίσταση και χωριστές ανόδους . Το σήμα εισόδου εφαρμόζεται στα δύο πλέγματα. Αν και οι δύο τρίοδοι έχουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά και $RL_1 = RL_2 = R$,τότε η τάση στην έξοδο ($\alpha_1 - \alpha_2$) είναι

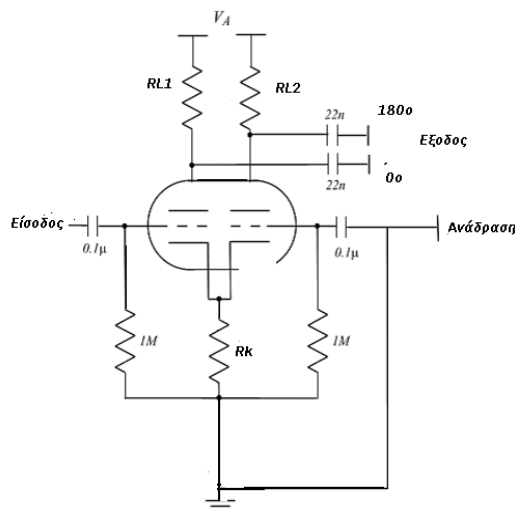
$$V_{out} = \mu V_g R / (r_a + R)$$

Όπου το V_g είναι το σήμα εισόδου

Παρομοίως τα σήματα εξόδου ως προς τη γη είναι

$$V_{out+} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu V_g R L}{R L + r_a} \right) \left(1 + \frac{R L + r_a}{R L + r_a + 2(\mu + 1) R_k} \right)$$

$$V_{out-} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\mu V_g R L}{R L + r_a} \right) \left(1 - \frac{R L + r_a}{R L + r_a + 2(\mu + 1) R_k} \right)$$



Σχήμα 15

Οι δύο τάσεις έχουν πολύ μικρή διαφορά, η οποία μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο χρησιμοποιώντας μεγάλη τιμή στην αντίσταση καθόδου ή λυχνίες με μεγάλη συντελεστή ενίσχυσης. Αν συνεχίζει να υπάρχει διαφορά τότε μπορεί να εξαλειφθεί τελείως κάνοντας την $RL1$ κατά λίγο μικρότερη από την $RL2$

Τα θετικά στοιχεία αυτού του κυκλώματος είναι η γραμμικότητα του, ευκολία της ρύθμισης του, χαμηλή παραμόρφωση και συνδέεται απευθείας με τα επόμενα στάδια. Τα αρνητικά του είναι το μέτριο κέρδος του και ότι οι λυχνίες πρέπει να είναι ταιριασμένες και καλύτερα ακόμα να βρίσκονται στο ίδιο γυαλί.

3.4 Στάδιο εξόδου

Το στάδιο εισόδου είναι αυτό όπου εφαρμόζεται η γενική αρνητική ανάδραση. Πρέπει λοιπόν να παρέχει μια ανεστραμμένη και μια μη ανεστραμμένη είσοδο και οι δύο χαμηλού θορύβου. Το διαφορικό ζευγάρι τριόδου είναι ένας προφανής υποψήφιος για αυτό το στάδιο, αλλά και το στάδιο κοινής καθόδου τριόδου ή πεντόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπου η γενική ανάδραση εφαρμόζεται στην κάθοδο. Η σχεδίαση του σταδίου εισόδου είναι τετριμμένη αλλά μπορεί να γίνει λίγο πιο πολύπλοκη στην περίπτωση άμεσης ζεύξης με το στάδιο του διαχωριστή φάσης.

4.1 Εισαγωγή

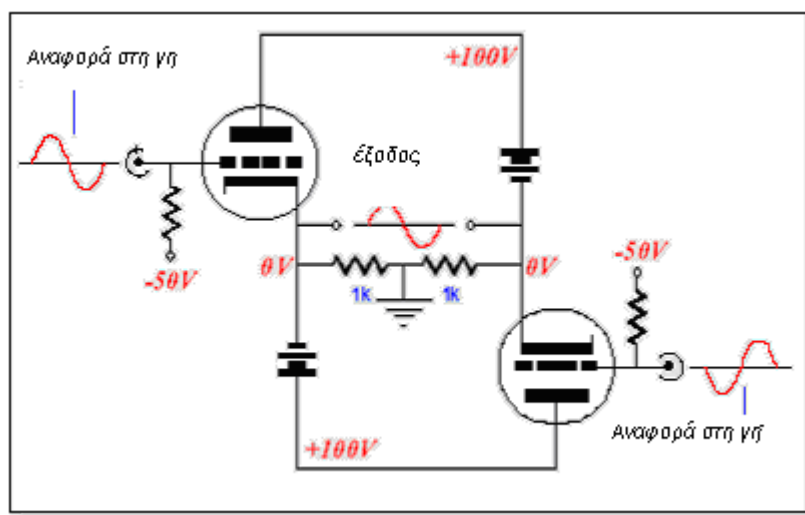
Η επιλογή της τοπολογίας εξόδου είναι από τα πιο σημαντικά σημεία για την σχεδίαση και την κατασκευή του τελικού ενισχυτή, διότι καθορίζει τις απαιτήσεις για το κέρδος ενίσχυσης, την δυνατότητα κυμάτωσης και φυσικά την πόλωση των προηγούμενων σταδίων (στάδιο εισόδου και οδήγησης). Όπως επίσης και τις επιλογές για τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους. Από τις τοπολογίες που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει επιλεγεί το κύκλωτρο.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του έχουν παίξει άρθρα από κατασκευαστές ενισχυτών, κάποια από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω, όπου τα αποτελέσματα τόσο για την αντίσταση εξόδου όσο και για την απόδοση του σε ισχύ αλλά και την ευστάθεια του κυκλώματος είναι θεαματικά. Είναι σημαντικό πριν από την παρουσίαση της κατασκευής να γίνει αναλυτική αναφορά για την λειτουργία του κυκλώτρου.

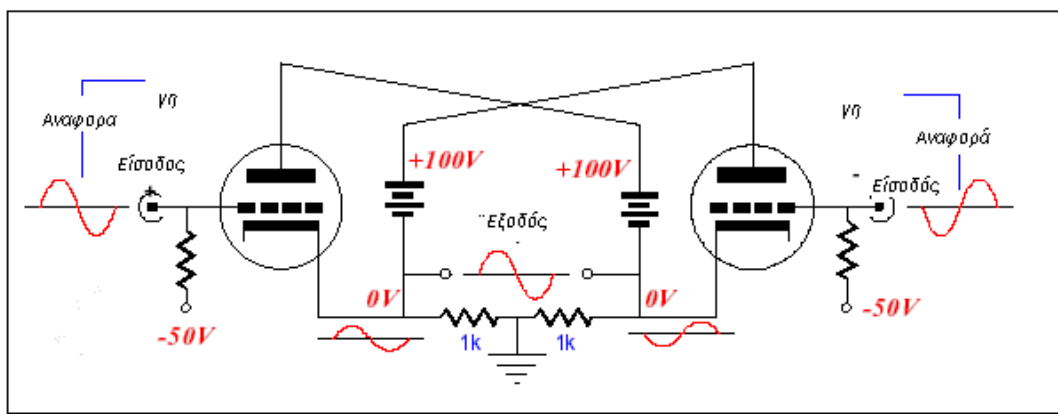
4.1.1 Λειτουργία Κυκλώτρου

Η συνδεσμολογία του κύκλωτρου παρουσιάζεται στα σχήματα ένα και δύο, υλοποιημένη με τριόδους. Η ίδια διάταξη πραγματοποιείται και με τις πεντόδους ή τις τετρόδους. Παρατηρούμε ότι το σημείο αναφοράς βρίσκεται στο μέσο του σήματος εξόδου.

Για να μελετήσουμε την λειτουργία του θα θεωρήσουμε ότι έχουμε τοποθετήσει μια μπαταρία 2 volt ανάμεσα στις εξόδους, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 1 Κύκλωτρο



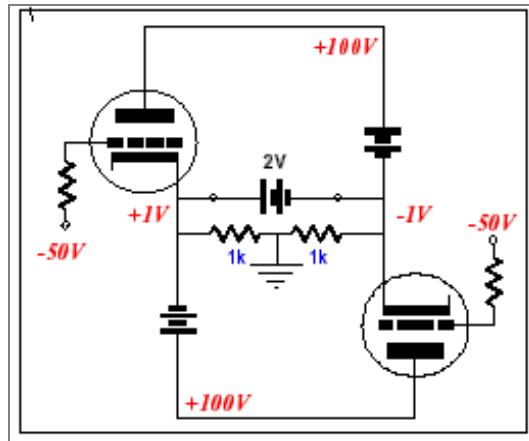
Σχήμα 2 Κύκλωτρο

Η κάθοδος της επάνω λυχνίας θα αναγκαστεί να γίνει θετικότερη κατά ένα volt, ενώ το κεντρικό σημείο της τροφοδοσίας θα γίνει αρνητικότερο κατά ένα volt, αναγκάζοντας και την κάθοδο της άλλης λυχνίας να γίνει αρνητικότερη κατά ένα volt. Επειδή όμως κανένα από τα πλέγματα δεν έχει αλλάξει τάση, η επάνω λυχνία βλέπει κατά 1 volt αρνητικότερη τάση πλέγματος, με αποτέλεσμα να άγει λιγότερο. Εν αντιθέσει, η κάτω λυχνία βλέπει την τάση πλέγματος κατά ένα volt θετικότερη με αποτέλεσμα να άγει περισσότερο.

Αυτό προκαλεί μια αύξηση της τάσης της ανόδου στην επάνω λυχνία και μια μείωση στην κάτω. Δηλαδή οι λυχνίες αγωνίζονται να ακυρώσουν την τάση της μπαταρίας κατά μήκος της εξόδου. Η υπεραγωγιμότητα τους τροφοδοτεί τις προσπάθειες τους.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κάθε τρίοδος βλέπει μόνο το μισό της τάσης της μπαταρίας και σε αντίθετη φάση, που είναι λογικό μιας και η αναφορά πέφτει στο μέσο των άκρων της εξόδου. Επίσης κάθε τρίοδος έβλεπε ολόκληρη την τάση της μπαταρίας να προστίθεται στην τάση καθόδου- ανόδου, αρνητικά στην πάνω και θετικά στην κάτω.

Στο παράδειγμα με την μπαταρία μπορεί να δει κάποιος ότι, κατά την διάρκεια σύνδεσης της με τους ακροδέκτες της εξόδου, ρέει κάποια ποσότητα ρεύματος κατά μήκος της, το οποίο συνδέεται άμεσα με την εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή(από τον νόμο του $\Omega m V=IR$).



Σχήμα 3

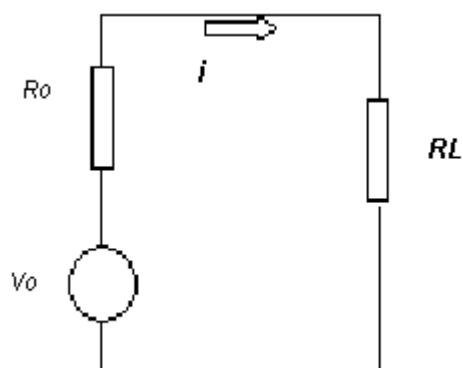
Η σχεδίαση ενός κυκλώματος ενίσχυσης, μπορεί να γίνει με δύο βασικούς τρόπους. Είτε ξεκινώντας από τις απαιτήσεις σε ισχύ του ενισχυτή και ακολουθώντας τα στάδια προς τα πίσω είτε, είτε θεωρώντας μια συνηθισμένη τιμή βασικής εισόδου και προχωρώντας μπροστά μέχρι το τελικό στάδιο. Βέβαια τα σχέδια για πολλούς λόγους μπορούν να αλλάξουν πολλές φορές. Η βασική απαίτηση είναι η προσέγγιση των καλύτερων δυνατών προδιαγραφών σε κάθε στάδιο, χωρίς υψηλές τιμές παραμόρφωσης και όσο το δυνατό λιγότερα ήδη παραμόρφωσης.

4.1.2 Εμπέδηση εξόδου

Πολλές προδιαγραφές των ενισχυτών έχουν μικρή επίδραση στο πως ακούγεται ένας ενισχυτής, αλλά μία έχει τεράστια επιρροή. Αυτή είναι η εμπέδηση εξόδου.

Υπάρχουν δύο κύριες περιοχές στις οποίες η εμπέδηση εξόδου επηρεάζει την ακουστική του ηχείου. Η μία είναι η απόκριση συχνοτήτων και η άλλη είναι ο έλεγχος του κώνου του ηχείου. Και οι δύο είναι εξίσου σημαντικές και επηρεάζονται από την εμπέδηση εξόδου με παρόμοιο τρόπο.

Βασικότερο από όλα εξαρχής είναι η μοντελοποίηση της εμπέδησης εξόδου του ενισχυτή, ώστε τα χαρακτηριστικά της να ερευνηθούν και να εξηγηθούν. Η απλούστερη μοντελοποίηση ενός ενισχυτή που οδηγεί ένα ηχείο φαίνεται στο σχήμα 4



Σχήμα 4

Από τα τρία αυτά στοιχεία του σχήματος 4 τα V_o , R_o βρίσκονται μέσα στον ενισχυτή και δεν υπάρχουν σαν φυσικά στοιχεία. Η κυκλωματική διάταξη παρουσιάζει, ένα μοντέλο, του πώς ένας ενισχυτής

λειτουργεί. Τα σύμβολά αναπαριστούν την δικτυακή επίδραση της λειτουργίας του ενισχυτή. Το τρίτο στοιχείο αναπαριστά ένα φορτίο τοποθετημένο στον ενισχυτή όπως θα ήταν τοποθετημένο ένα ηχείο. Το τροφοδοτικό έχει θεωρηθεί ιδανικό, χωρίς εσωτερική αντίσταση. Η συνολική εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή αναπαριστάτε λοιπόν από την R_o . Το ρεύμα που ρέει κατά μήκος του βρόχου, βρίσκεται από τον νόμο του Ωm .

$$I = \frac{V_o}{R_o + R_L}$$

Τοποθετώντας τυπικές τιμές στα διάγραμμα φαίνεται η συμπεριφορά του ενισχυτή. Π.χ θεωρώντας $10V=V_o$ $R_L=8\Omega m$, $R_o=0.01\Omega m$ το $I= 1,248 A$. Πολλαπλασιάζοντας αυτό με τις αντιστάσεις υπολογίζεται η πτώση τάσης στις αντιστάσεις ($9,988 + 0.012$), όπου παρατηρείται ότι σχεδόν όλη η ισχύς της V_o καταναλώνεται από το φορτίο. Στην περίπτωση ανοιχτοκύκλωσης, με απομάκρυνση της R_L , η τάση εξόδου θα ανέβει στα $10 Volt$, ισοδύναμη με την πηγή τάσης. Αυτό γιατί, λόγω του ανοιχτοκυκλώματος, δεν υπάρχει ρεύμα να ρέει στο κύκλωμα, άρα δεν υπάρχει πτώση τάσης κατά μήκος της R_o .

Σε περιπτώσεις όπου η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή είναι πολύ μεγαλύτερη, γίνεται κατανοητό ότι και η ισχύς εξόδου του ενισχυτή ως προς το ηχείο ελαττώνεται, λόγω της μείωσης του ρεύματος στο βρόχο αλλά και λόγω της ελάττωσης της πτώσης τάσης ($V_{out} = R_L/(R_L+R_o)$).

Αν όλα τα ηχεία είχαν σταθερή εμπέδηση ως προς την συχνότητα, υψηλής εμπέδησης ενισχυτές θα προκαλούσαν απλά μείωση στο κέρδος τάσης, χωρίς ουσιαστική επίδραση στον ήχο. Δυστυχώς όμως τα περισσότερα ηχεία έχουν ευρεία μεταβολή της εμπέδησης εξόδου με την συχνότητα. Ένα ηχείο $8 \Omega m$ μπορεί τυπικά να έχει εμπέδηση $4\Omega m$ στις μπάσες συχνότητες και $20\Omega m$ στις υψηλές.

Θεωρώντας ένα ενισχυτή με εμπέδηση εξόδου $3\Omega m$ και τάση εξόδου $10 volt$. Στις υψηλές συχνότητες η τάση που παράγεται στο ηχείο είναι $10*20/(20+3)=8.7 volt$.

Αυτό είναι μια μείωση στην έξοδο ως προς τις συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης της τάξης του $1.2dB$.

Στην περίπτωση των μπάσων συχνοτήτων η τάση εξόδου είναι $5.7 volt$. Δηλαδή μείωση $4.9dB$.

Παρατηρείται λοιπόν ότι το επίπεδο πίεσης των ηχείων θα είναι κατά $3.7dB$ δυνατότερο στις υψηλές από ότι στις χαμηλές συχνότητες.

Όσο όμως η εμπέδηση εξόδου μεγαλώνει, αυτές οι διαφορές στην απόκριση της συχνότητας μεγαθύνονται. Η μεταβαλλόμενη εμπέδηση του ηχείου στην πραγματικότητα σπρώχνει την τάση εξόδου του ενισχυτή τριγύρω και με αυτό τον τρόπο αλλάζει την ακουστική έξοδο του ηχείου.

4.1.2.α Γιατί η εμπέδηση του ηχείου αλλάζει με την συχνότητα;

Η λειτουργία του ηχείου είναι να παράγει ένα σταθερό επίπεδο πίεσης ήχου για μια σταθερή τάση οδήγησης σε ένα καθορισμένο πεδίο συχνοτήτων. Η ισχύς καθορίζεται από το γινόμενο της τάσης επί του ρεύματος. Αν η εμπέδηση του ηχείου πέσει και η τάση του ενισχυτή κρατηθεί σταθερή, τότε το ρεύμα στο ηχείο αυξάνεται. Αν το ρεύμα αυξηθεί, τότε και η καταναλισκόμενη ισχύς αυξάνεται. Ο λόγος που το ηχείο δεν γίνεται πιο δυνατό είναι γιατί αλλάζει η απόδοση. Όσο η εμπέδηση μειώνεται τόσο μειώνεται και η απόδοση. Αυτό που μετράει είναι ότι η ακουστική απόδοση παραμένει σταθερή.

Τα ηχεία δεν είναι συσκευές σταθερής ισχύος. Τα ηχεία πρέπει να έχουν μια σταθερή τάση οδήγησης ώστε να παρέχουν μια σταθερή έξοδο με μεταβαλλόμενη συχνότητα. Όπως φάνηκε και από τις σχέσεις παραπάνω ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί σταθερή τάση οδήγησης με μεταβαλλόμενο φορτίο, είναι η χαμηλή εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή.

4.1.2.β Ελέγχοντας την Κίνηση του Κώνου

Το ηχείο είναι μια μηχανική συσκευή. Ουσιαστικά είναι ένας κινητήρας. Ένας κινητήρας προκαλεί κίνηση όταν ένα πηνίο εκτεθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο. Όταν ο κώνος των χαμηλών συχνοτήτων κινείται το πηνίο του κινείται μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο οι γεννήτριες παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Πως ένας ενισχυτής αντεπεξέρχεται στο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα από το ηχείο;

Ένα ηχείο μπορεί να μοντελοποιηθεί μαθηματικά. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι κυκλωματικά το ηχείο παρουσιάζεται σαν μια πολύπλοκη διάταξη παθητικών στοιχείων (πυκνωτών και πηνίων). Το ρεύμα εξόδου του ενισχυτή περνάει από αυτή την εμπέδηση και προκαλεί μια πτώση τάσης κατά μήκος τους. Η προκαλούμενη αυτή τάση πρέπει να ελέγχεται από την εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή αλλιώς θα αλλάξει την συμπεριφορά της κίνησης του κώνου.

Οι υπολογισμοί γίνονται όπως προηγούμενα για την απόκριση της συχνότητας αλλά λειτουργούν αντίστροφα. Για να κρατηθεί η τάση, που παράγεται από την κίνηση του κώνου, χαμηλή, το ρεύμα που προκαλείται στο ηχείο πρέπει να περάσει μέσα από πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου του ενισχυτή. Ένας καλός κανόνας είναι η αναλογία 10:1 εμπέδηση φορτίου προς εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή, ώστε να υπάρχει καλός έλεγχος της κίνησης του ηχείου. Η διαφορετικά η εμπέδηση εξόδου πρέπει να είναι χαμηλότερη από την μονάδα.

4.1.2.γ Υπολογίζοντας την εμπέδηση Εξόδου

Η εμπέδηση εξόδου υπολογίζεται εύκολα. Παρακάτω αναλύονται τρεις τύποι ενισχυτών single – ended, push –pull, OTL. Οι ενισχυτές με στοιχεία στερεάς κατάστασης είναι παρόμοιοι με τους OTL.

Single-Ended

Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός των εμπεδήσεων των στοιχείων εξόδου. Σαν παράδειγμα δεχόμαστε την λυχνία 300B, που έχει εμπέδηση ανόδου 700Ω. Αν υπήρχαν παραπάνω από μία λυχνίες διαιρείται η εμπέδηση αυτή με τον αριθμό των λυχνιών. Μετά υπολογίζεται η αναλογία εμπέδησης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εξόδου. (π.χ $3000/8=375$). Η εμπέδηση εξόδου είναι λοιπόν η εμπέδηση της λυχνίας διαιρούμενη από την τιμή της αναλογίας του μετασχηματιστή ($700/375=2.13$). Ο τρόπος περαιτέρω μείωσης της εμπέδησης είναι αρνητική ανάδραση.

Push-Pull

Σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα ζευγάρι 6550 με ένα μετασχηματιστή με 5000Ω πρωτεύον ($5000/8=625$). Οι δύο 6550 έχουν συνδυασμένη εμπέδηση ανόδου περίπου 10000Ω σε συνδεσμολογία πεντόδου. Άρα εμπέδηση εξόδου $10.000/625=16\Omega$. Η χρήση ανάδρασης σε αυτή την περίπτωση είναι ουσιώδους σημασίας για την ελάττωση της . Οι ενισχυτές αυτής της φύσεως απαιτούν 25dB ανάδραση για να έχουν εμπέδηση εξόδου 0.8Ω.

OTL

Χρησιμοποιώντας 8 PL509 σε διάταξη push –pull. Κάθε 509 έχει r_a 150Ω, άρα $150/8=18.75\Omega$. Η αρνητική ανάδραση είναι απαραίτητη. Διαφορετικές λυχνίες θα παρείχαν παρόμοια αποτελέσματα. Η διαμόρφωση στα στάδια εξόδου στους OTL δεν ενδιαφέρει αν οι λυχνίες είναι σε σειρά ή παράλληλα συνδεδεμένες στο push –pull. Ο παράγοντας ελέγχου είναι ο αριθμός των στοιχείων εξόδου και η εμπέδηση ανόδου τους. Μία 6AS7G είναι μια διπλοτρίοδος με εμπέδηση ανόδου 280Ω. Ένας μετασχηματιστής που χρησιμοποιεί 8 από αυτές θα έχει εμπέδηση εξόδου $280/16=17.5$.

Για την μείωση λοιπόν της εμπέδησης εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους OTL ,εκτός, από την ανάδραση και ο αριθμός των λυχνιών.

4.2 Σχεδιασμός και Αποφάσεις

Η απειρία στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ενισχυτών ήταν ένας σημαντικός λόγος για να ξεκινήσει το εργασιακό μέρος από την μελέτη ήδη υπαρχόντων σχεδίων και σίγουρα ελεγμένων διατάξεων. Μελετώντας λοιπόν διάφορα άρθρα όπως αυτό του των Tomcik & Wiggins, Shinichi Kamijo, Dorsey's, Alan Kimmel, Futterman's και από site της Electro Voice , Mullard, tube lover anonymous, Atma-sphere και πολλά άλλα. Όλα τα άρθρα σχετικά με otl ενισχυτές είχαν ενθαρρυντικές, προς επίδοξους κατασκευαστές, αναφορά ως προς την συμπεριφορά του κύκλωτου. Η απόφαση ήταν αναμενόμενη. Η επιλογή του σχεδίου για την έξοδο θα ήταν διάταξης κύκλωτου.

Το σημαντικότερο από τα βήματα μια κατασκευής είναι η σωστή επιλογή της διάταξης . Η επιλογή αυτή δεν πρέπει να έχει αναφορά το επιθυμητό αποτέλεσμα αλλά τις ικανότητες, τις γνώσεις και την εμπειρία του κατασκευαστή. Ένας αρχάριος είναι αρκετά δύσκολο να εντοπίσει τις διαφορές και να επιλέξει την απλούστερη οδό η οποία είναι και ουσιαστικά η επιθυμητή, για να δώσει τελικά την εμπειρία που ψάχνει με τα λιγότερα δυνατά προβλήματα. Το λάθος αυτό δυστυχώς ακολούθησε όλη την πορεία της κατασκευής.

Μιας και είναι ευκολότερο να εντυπωσιαστεί κάποιος από την πολυπλοκότητα και τις υψηλές επιδόσεις το άρθρο του Αλαν Κιμελ τράβηξε την προσοχή μου. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 5. Η σχεδίαση του σταδίου εξόδου ήταν κύκλωτο με τις πεντόδους EL519 ,μόνο που αντί για λειτουργία κλασικής πεντόδου με τροφοδότηση των πλεγμάτων με DC τάση ακολουθώντας την κάθοδο, διαμόρφωσε την τροφοδοσία του δεύτερου πλέγματος με το ίδιο σήμα οδήγησης με το αυτό του πλέγματος ελέγχου. Αυτό έδινε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόδοση μετατρέποντας όπως ισχυρίζεται ο ίδιος σε Super CF's. Η διαμόρφωση αυτή στα πλέγματα έδινε πέρα από την πολύ καλή της απόδοση και δυνατότητα μικρότερης τάσεως στο δεύτερο πλέγμα. Μερικά από τα αποτελέσματα που δίνει ο ίδιος στο άρθρο του είναι:

Συμπεριφορά με 8 λυχνίες εξόδου:

Απόκριση συχνότητας 16Hz με 26KHz με 0,3 dB

230Wrms σε 16 Ω φορτίο

Wrms σε 8Ω φορτίο

140 Wrms σε 4Ω φορτίο

THD 0.08% 5Wrms

0.3% 50Wrms

0.35% 150Wrms

Εμπέδηση Z 0.5Ω

Ευαισθησία εισόδου

Unbalanced input 1,7Vrms για πλήρη έξοδο

Balanced input 2*0,85 Vrms για πλήρη έξοδο

Συμπεριφορά με 6 λυχνίες έξοδο :

Ισχύς εξόδου 160Wrms σε 8Ω φορτίο

THD 0,2% ~5W

0,37%~50W

0,4%~100W

Zout ~0,6Ω

Συμπεριφορά με 4 λυχνίες εξόδου:

Ισχύς εξόδου σε φορτίο 8Ω: 115 Wrms

THD: 0,2% ~5W

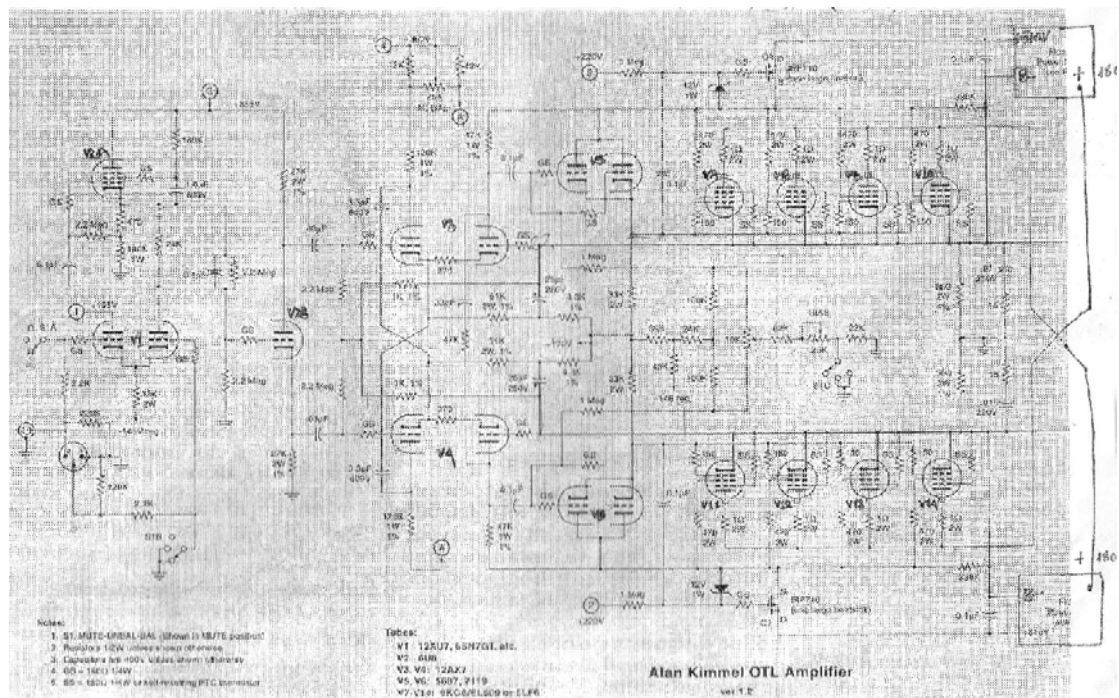
0,55%~50W

0,8% ~100W

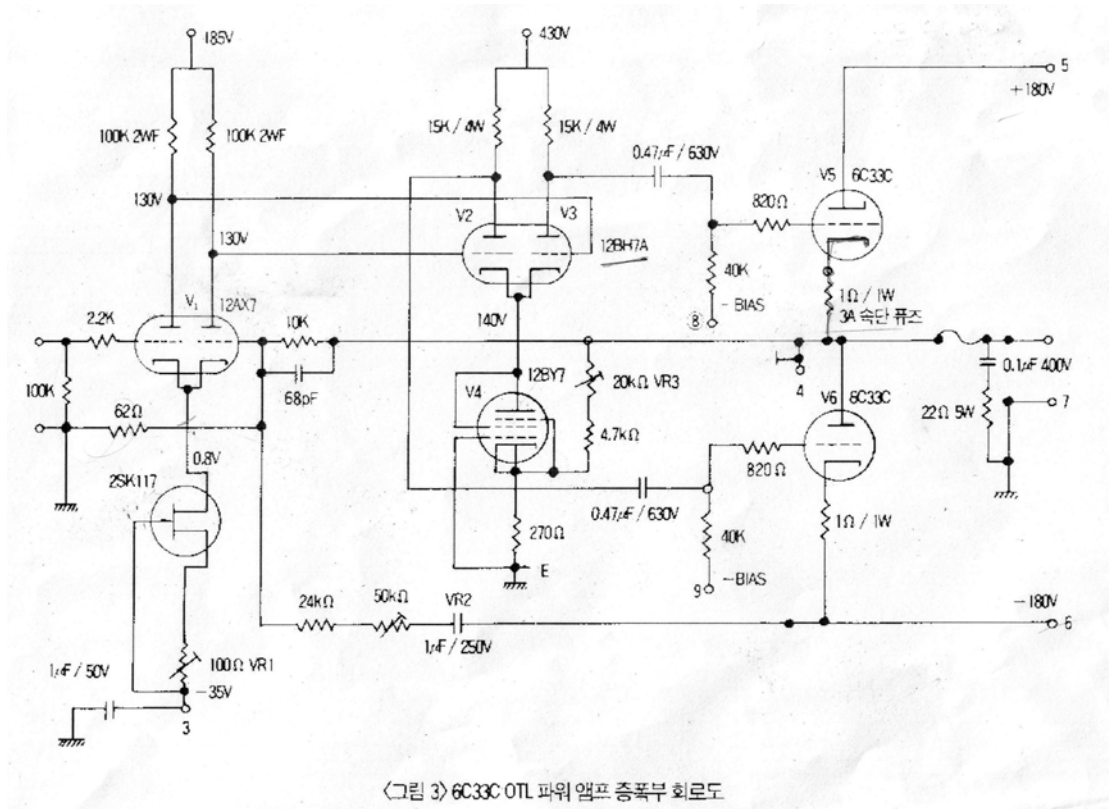
Zout=0,8Ω

Το μόνο μειονέκτημα ήταν η πολυπλοκότητα όλης της διάταξης, δηλαδή δεν ήταν κατανοητή στο επίπεδο που το απαιτούσε για να μπορέσει να κατασκευαστεί από έναν αρχάριο. Αποφάσισα λοιπόν να κρατήσω μόνο την τοπολογία της εξόδου ,κύκλωτρο με πεντόδους και να σχεδιάσω το στάδιο οδήγησης.

Η σχεδίαση του σταδίου εισόδου και οδήγησης βασικά βρέθηκε από συνδυασμό άλλων σχηματικών. Με την βοήθεια του spice κατάφερα να το μοντελοποιήσω και να το μελετήσω αρκετές φορές πριν ξεκινήσει η κατασκευή. Η βασική ιδέα ήταν χρήση της διάταξης του διαφορικού για την ενίσχυση του σήματος . Οι επιλογές για τον τρόπο ελέγχου του κέρδους ήταν είτε με μια απλή αντίσταση στην κάθοδο , είτε με κάποιο τύπο πηγής ρεύματος με τρανζίστορ , FET ή λυχνία. Η μελέτη του σχηματικού ενός γιαπωνέζου, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6, ήταν καθοριστική . Οι πηγές ρεύματος θα ήταν με fet. Το μοντέλο του Γιαπωνέζου φαινόταν πολύ απλό και κατανοητό, δεν πίστευα ότι μπορούν να παρουσιαστούν τόσα προβλήματα από τις πηγές ρεύματος . Η διαφοροποίηση του σχεδίου έχει να κάνει με την επιλογή των λυχνιών και την αντικατάσταση της 12BY7 με Fet , ώστε να μην χρειαστούν περαιτέρω τάσεις νήματος . Επίσης προστέθηκε και ένας απομονωτής μεταξύ σταδίου οδήγησης και εξόδου,θεωρώντας ότι θα φέρει καλύτερα αποτελέσματα στην απόδοση του ενισχυτή. Η πρώτη λοιπόν σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε εμφανίζεται στα σχήματα 7 και 8.Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν με βάση αυτό το μοντέλο είναι πολλά και αναλύονται παρακάτω. Έχουν να κάνουν τόσο με την επιλογή των λυχνιών και των τρανζίστορ , όσο και με την διάταξη.



Σχήμα 5 Ενισχυτής OTL του Αλαν Κιμελ



〈그림 3〉 6C33C OTL 파워 앰프 증폭부 회로도

Σχήμα 6. OTL ενισχυτής

4.2.1 Επιλογή λυχνιών

Από τα σχέδια που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε ότι σχεδόν όλοι χρησιμοποιούν παρόμοιες λυχνίες στα διάφορα στάδια. Οι λυχνίες αυτές είναι:

Στάδιο εισόδου: 6SN7, 12AU7 (ECC82), 12AX7 (ECC83), 12AT7 (ECC81)

Στάδιο οδήγησης: 12BH7, 12AU7, 12AT7

Στάδιο εξόδου : KT66, EL84, PL519/509, EL519/509, 6C33B, 6550

Φυσικά και άλλα μοντέλα λυχνιών, απλά αυτά είναι τα πιο διαδεδομένα και τα πιο εύκολα στην αγορά.

Για το στάδιο εξόδου είχε αποφασιστεί ότι οι λυχνίες θα ήταν PL519/509 ή EL519/509 6KG6 κ.τ.λ, όπως στο άρθρο. Όλες οι παραπάνω είναι ίδιες αλλά όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο με τα τροφοδοτικά αυτό που μας απασχολεί περισσότερο είναι η τάση στο νήμα θέρμανσης και η PL υπερέρχουν, διότι τροφοδοτούνται με 40V εναλλασσόμενο και έχουν απαίτηση σε ρεύμα 300mA, ενώ οι EL χρειάζονται αρκετά αμπέρ.

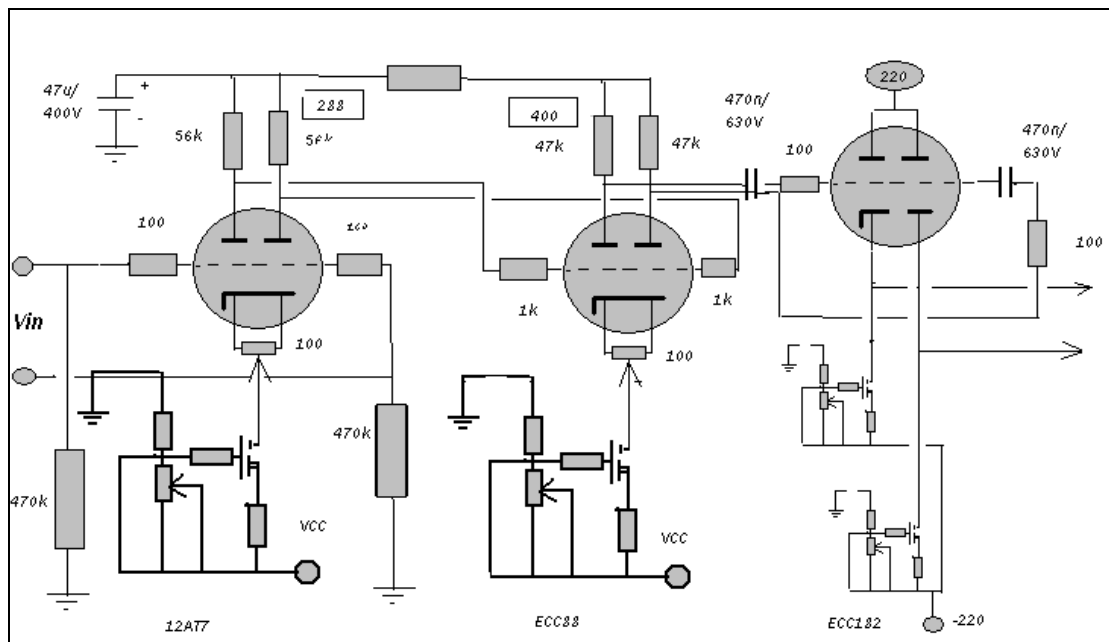
Απλά και μόνο επειδή ήταν διαθέσιμες εκείνη τη στιγμή οι διπλοτρίοδοι 12AT7, ECC182 και ECC88, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν αυτές. Η 12AT7 για το στάδιο εισόδου, ECC88 για το στάδιο οδήγησης και η ECC182 σαν απομονωτής μεταξύ της οδήγησης και της εξόδου.

4.3 Μοντελοποίηση

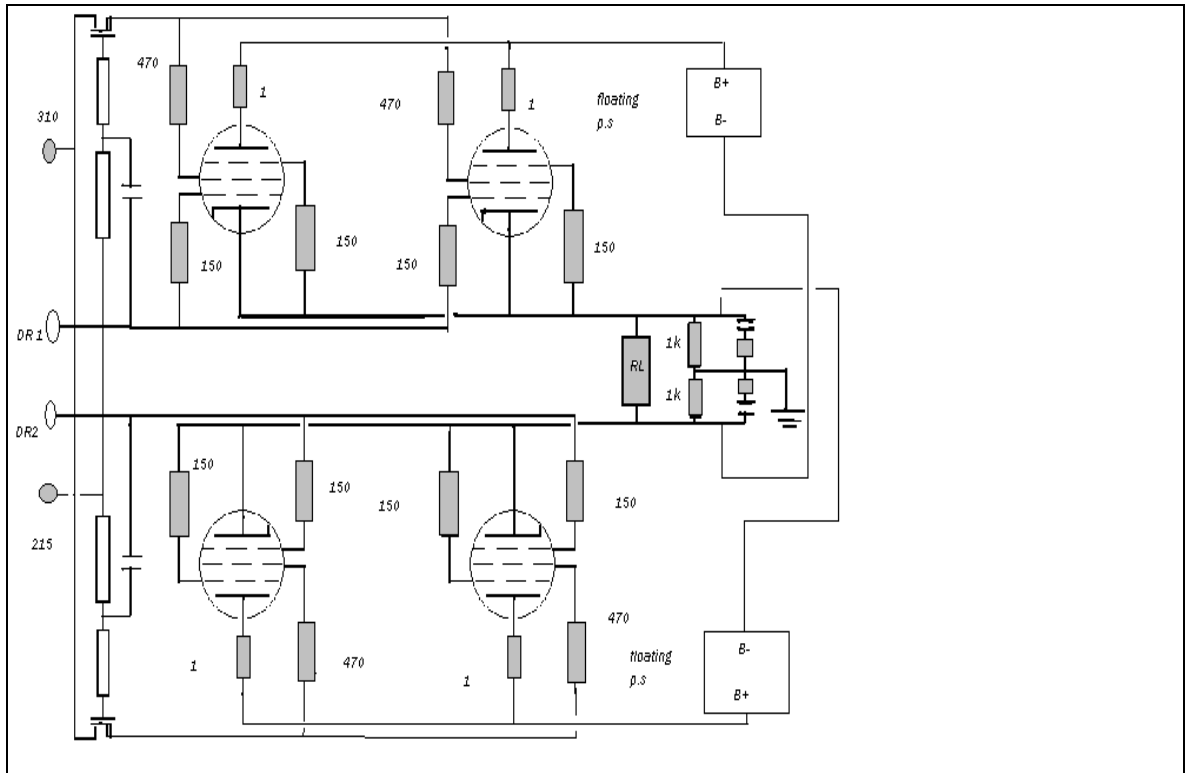
Με πολύ απλά βήματα και θέλοντας να διατηρηθεί όλη η σχεδίαση σε πολύ χαμηλά επίπεδα ρεύματος, έγινε η πρώτη σχεδίαση που παρουσιάζεται και στα σχήματα 7 και 8. Η σχεδίαση αυτής της διάταξης ξεκίνησε από την είσοδο προς την έξοδο, κάτι που αποδείχθηκε προβληματικό και επίπονο για κάποιον άπειρο στη σχεδίαση και την κατασκευή, διότι ξεχνάει να λάβει αρκετές παραμέτρους υπόψη και να κατανοήσει ευθύς εξαρχής τα πιθανά λάθη που έχουν γίνει κατά την σχεδίαση. Ο έλεγχος της σχεδίασης γινόταν παράλληλα με τη χρήση του spice. Όπως διαπιστώνεται όμως κάθε φορά, ο προσομοιωτής θεωρεί ιδανικές συνθήκες επομένως δεν μπορούν να αναμένονται τα αποτελέσματα να είναι τα ίδια αλλά τουλάχιστον προσεγγιστικά κοντά.

Η μοντελοποίηση της διάταξης στο έξι και στο εφτά με το προσομοιωτικό πρόγραμμα δίνονται στα διαγράμματα 9,10,11,12,13.

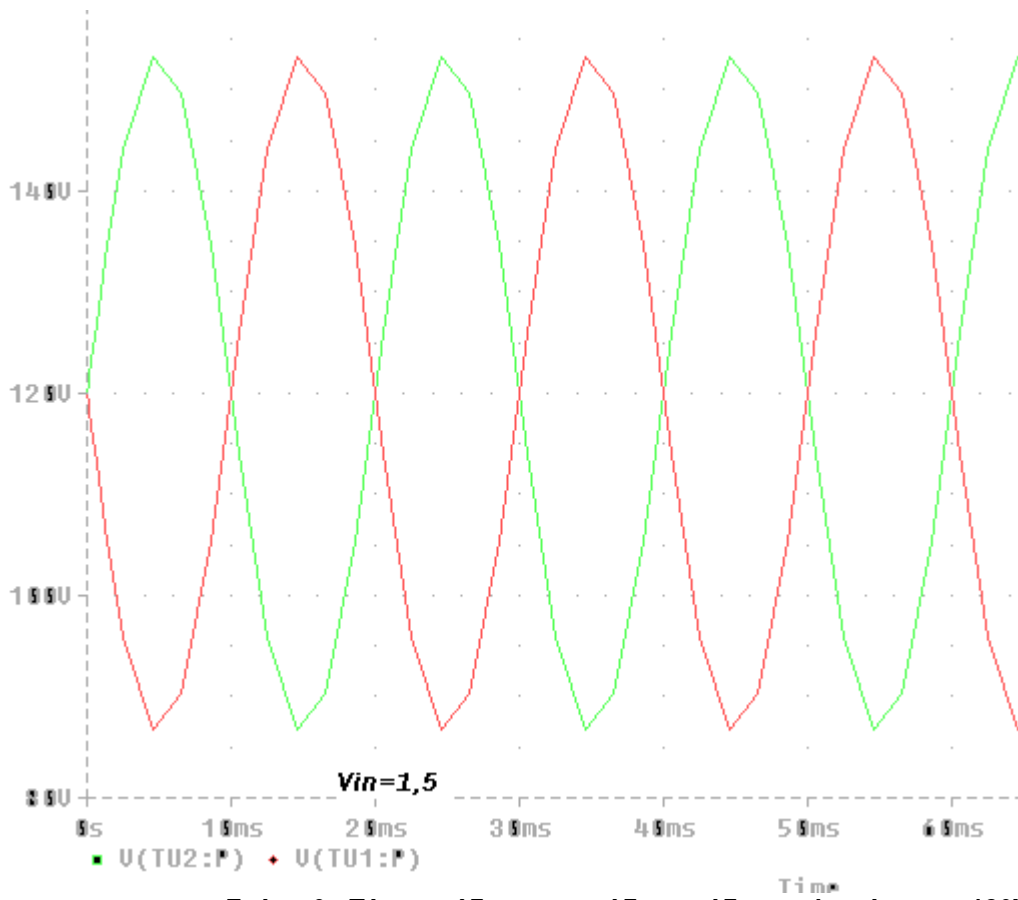
Συμπέρασμα μετά το πέρας της εργασίας αυτής ήταν,ότι η αρχή μια καλής κατασκευής είναι η προσεκτική, λεπτομερής και απλή αρχικά σχεδίαση της. Οποιοσδήποτε βελτιώσεις της διάταξης είναι προτιμότερο να γίνονται μετά την εξακρίβωση της καλής της λειτουργίας.



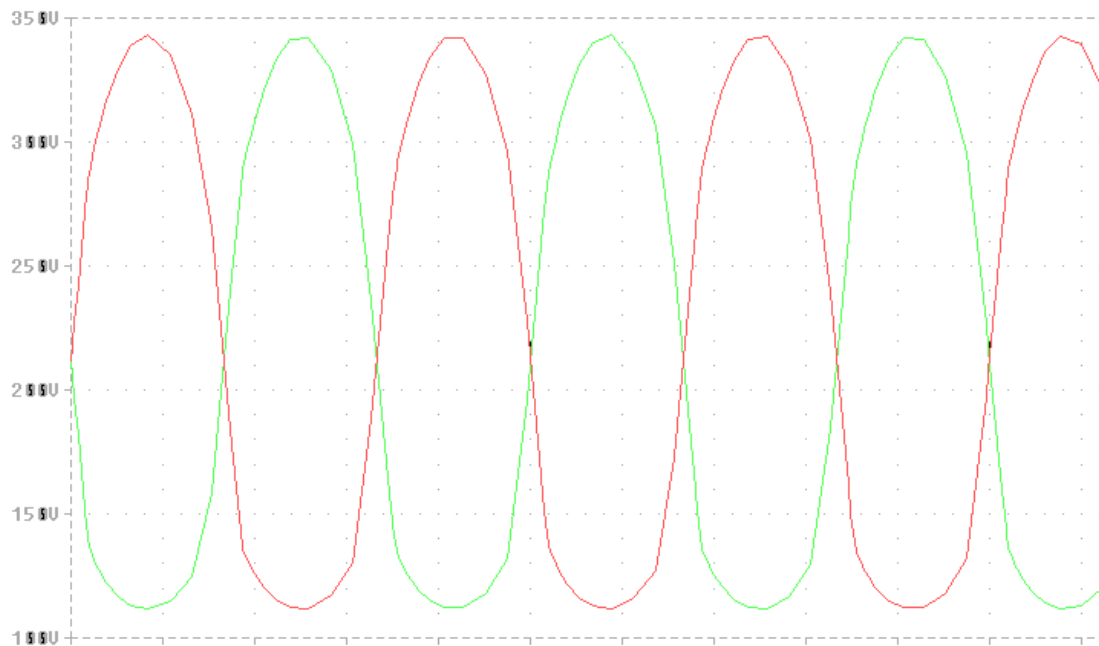
Σχήμα 7 Στάδιο εισόδου και οδήγησης



Σχήμα 8 Στάδιο εξόδου

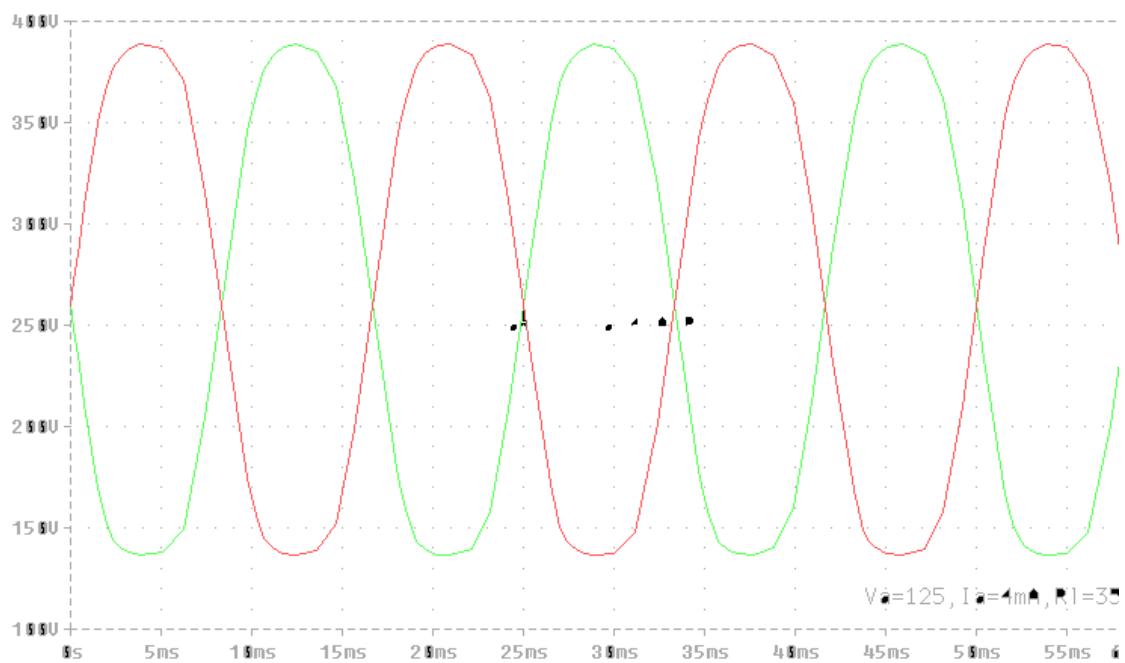


Σχήμα 9 Τάση ανόδου στο στάδιο εισόδου πολωμένο στα 120V

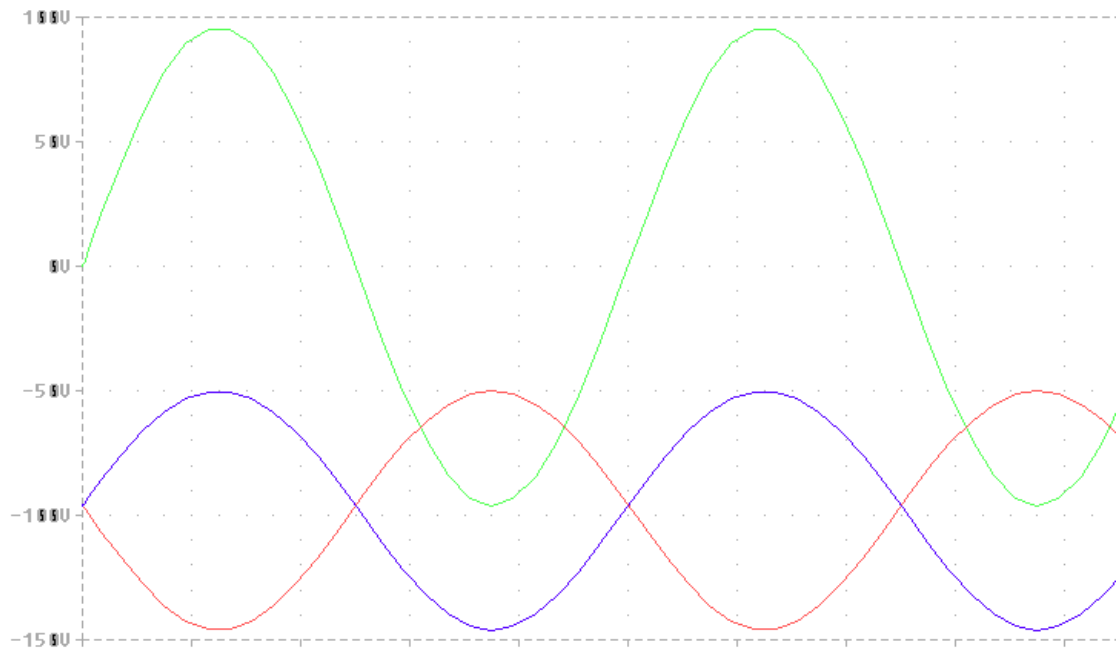


Σχήμα 10 Τάση ανόδου στην ECC88 με αντίσταση ανόδου 47K

Στο σχήμα 8 φαίνεται ότι η αντίσταση των 47K θα παρουσιάσει παραμόρφωση που δεν είχε γίνει αντιληπτή στη σχεδίαση με το χέρι. Δυστυχώς όμως δεν ήταν το μόνο πρόβλημα που εμφάνισε το συγκεκριμένο στάδιο.

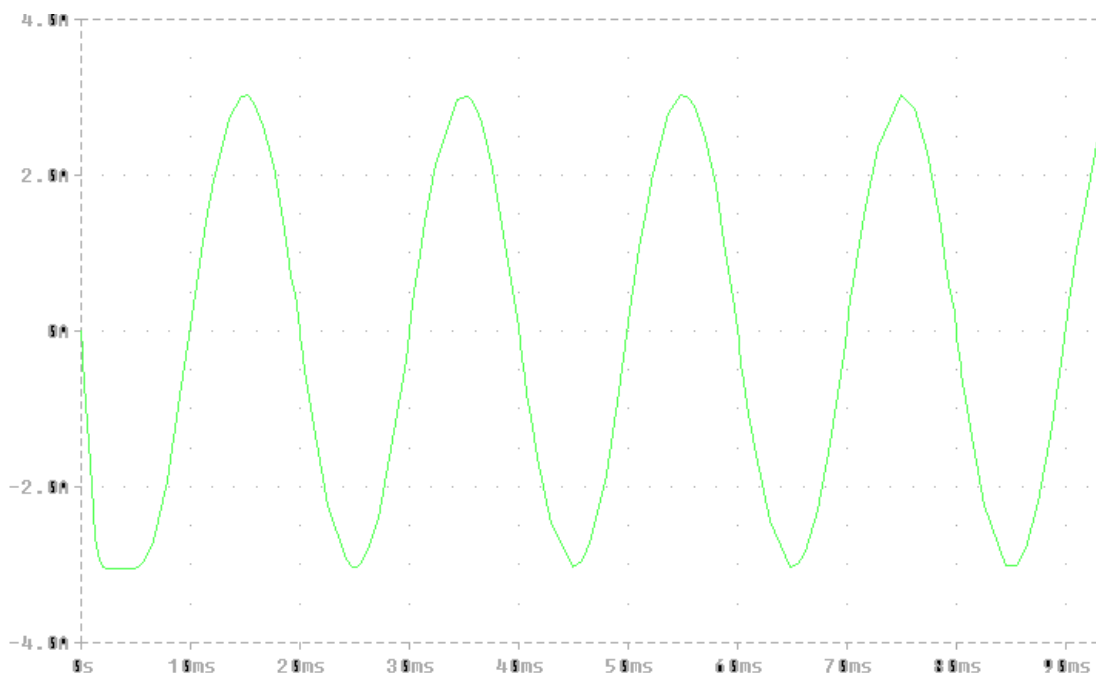


Σχήμα 11 Τάση ανόδου στην ECC88 με αντίσταση 35K. Όπως και χρησιμοποιήθηκε .



Σχήμα 12 Τάση και διαφορικό στις καθόδους του ακόλουθου καθόδου.

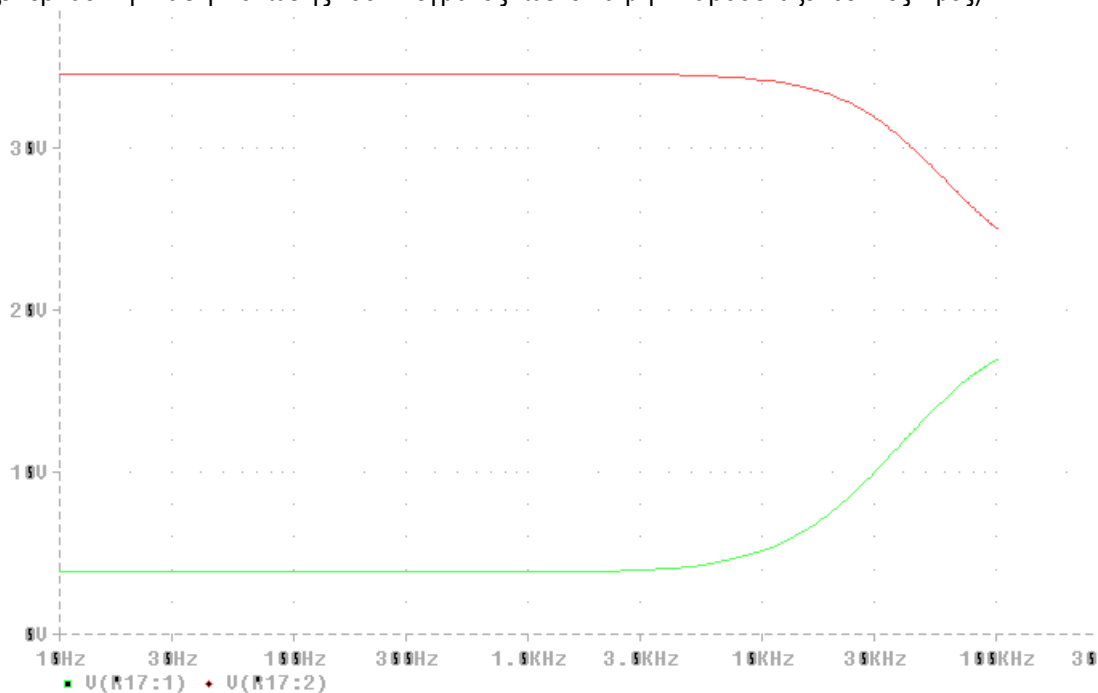
Η τάση εμφανίζεται αρκετά ελαττωμένη όσον αφορά το πλάτος peak-peak, όσο ακριβώς απαιτείται στην είσοδο του σταδίου εξόδου για την αναμενόμενη ισχύ. Στην πραγματικότητα η τάση peak-peak ήταν στα 180V και όχι 100V, παρουσιάζοντας σημαντική υπεροδήγηση των πεντόδων, με πιθανά καταστροφικά αποτελέσματα.



Σχήμα 13 Ρεύμα εξόδου

Το ρεύμα εξόδου μετρήθηκε σε αντίσταση 8Ω ώστε να μας δίνει την αντίστοιχη ισχύ εξόδου. Η τιμή που έδωσε το spice ήταν και η επιθυμητή για την απολαβή των 38Watt. Όμως αυτό που αποδείχτηκε είναι ότι οι λυχνίες αυτές δεν μπορούν ουσιαστικά να αποδώσουν τόση ισχύ παρά μόνο χρησιμοποιώντας, μεγαλύτερο αριθμό λυχνιών. Διότι κάθε μία από αυτές αντέχει μέχρι 0,5 A και εγώ απαιτούσα τα 1,1 A rms

από την κάθε μία . Έτσι εξαναγκαστικά έπρεπε να πέσει η τάση εισόδου για το στάδιο εξόδου.(και να μην ξεπερνάει την τάση πόλωσης του πλέγματος ώστε να μην παρουσιάζει θετικές τιμές)



Σχήμα 14 Απόκριση συχνότητα στην έξοδο

Τα μοντέλα των λυχνιών κατασκευάστηκαν όπως αναφέρεται στο παράρτημα Α, είτε βρέθηκαν έτοιμες βιβλιοθήκες από κάποιες ιστοσελίδες.

Οι χαρακτηριστικές των λυχνιών όσες δεν υπήρχαν στα φύλλα του κατασκευαστή , φτιάχτηκαν είτε με την χρήση του spice (αν υπήρχε το μοντέλο) , είτε με χρήση του matlab, όπως ακριβώς αναφέρεται στην σελίδα του www.normankoren.com σε αναφορικό άρθρο για την βελτίωση των μοντέλων των λυχνιών στο spice. Οι γραφικές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την πόλωση των λυχνιών , ώστε να εξαχθούν τα παραπάνω κυκλώματα .

Ένα από τα μεγάλα προβλήματα που μπορούν να εμφανιστούν είναι είτε η έλλειψη των χαρακτηριστικών των λυχνιών ,είτε η ύπαρξη τους σε αλλοιωμένη μορφή. Τα αποτελέσματα που παίρνεις από τα σχεδιαστικά προγράμματα είναι προσεγγιστικά και κάποιες φορές παραπλανητικά .Η δυσκολότερη μορφή γραφικών είναι αυτή των πεντόδων σε συνδεσμολογία τριόδου .Ειδικά με το spice τα αποτελέσματα μπορεί να απέχουν μακράν τις πραγματικότητας , για αυτό συστήνεται το matlab σαν εγκυρότερη πηγή.

Η παραπάνω διάταξη δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ ούτε και επιβεβαιώθηκε το θεωρητικό μοντέλο, λόγω των πολλών προβλημάτων που παρουσίασε. Χρειάστηκε λοιπόν η διάταξη να φτάσει στην απλούστερη της μορφή για λειτουργήσει ολοκληρωτικά για πρώτη φορά. Στην επόμενη παράγραφο ακολουθεί η περιγραφή των όσων προβλημάτων παρουσιάστηκαν , συνοπτικά ,διότι τα περιγραφόμενα συνέβησαν σε ένα χρονικό διάστημα έξι μηνών.

4.4 Κατασκευή και προβλήματα

Έχοντας λάβει όλες τις σχετικές αποφάσεις ,η κατασκευή μπορούσε να ξεκινήσει. Το πρώτο βήμα ήταν η κατασκευή του τροφοδοτικού. Τα πρόβλημα ήταν ότι τα εξαρτήματα ήταν πάρα πολλά (λόγω της σταθεροποίησης) και ήταν απαραίτητο να σχεδιαστεί σε PCB layout για ευκολότερη χρήση. Το τυπωμένο κύκλωμα παρουσιάζεται μαζί με το σχηματικό στο παράρτημα Γ .Η σχεδίαση του τροφοδοτικού περιγράφεται αναλυτικά στο 5^ο κεφάλαιο.

Από τα πρώτα βήματα τις κατασκευής παρουσιάστηκαν προβλήματα. Το πρώτο από όλα ήταν η ανακάλυψη της παράλειψης του τροφοδοτικού για το δεύτερο πλέγμα των πεντόδων εξόδου. Όχι και τόσο σημαντικό αν το σκεφτεί κανείς ,μπορεί να κατασκευαστεί ένα μικρό εξωτερικό κύκλωμα, όμως μετά από όσα προβλήματα εμφανίστηκαν, δεν υπήρχε διάθεση για περαιτέρω λεπτομέρειες .Επίσης οι πυκνωτές που χρειαζόνταν ήταν αρκετά μεγάλοι και η κατανομή δεν είχε γίνει σωστά, ώστε να προστεθούν με ευκολία και άλλα εξαρτήματα. Έτσι περιορίστηκε το στάδιο εξόδου σε συνδεσμολογία τριόδου, όπως εμφανίζεται παρακάτω στο τελικό στάδιο.

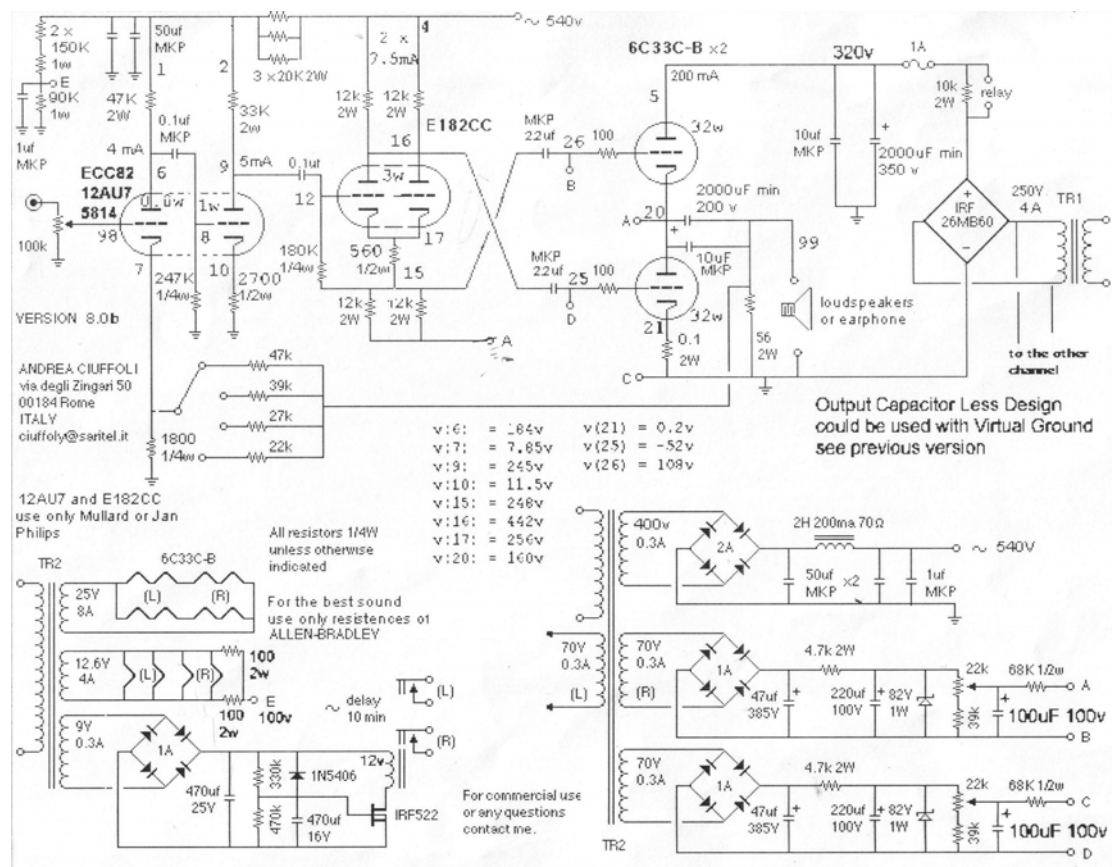
Κατά την σχεδίαση του τροφοδοτικού όλα λειτούργησαν χωρίς προβλήματα με κάποια υποθετικά φορτία. Όπως διαπιστώθηκε είναι προτιμώτερο να γίνονται οι μετρήσεις πάνω σε πραγματικό φορτίο ,κερδίζεις χρόνο και έχεις τις πραγματικές τιμές των ρευμάτων χωρίς να χρειάζεται να γίνονται συνεχής αλλαγές των αντιστάσεων που καθορίζουν την τιμή της τάσεως εξόδου. Με μια μεταβλητή αντίσταση όλα αυτά λύνονται εύκολα ,αλλά πέρα από το γεγονός της παρουσίας παρασιτικής χωρητικότητας σε αυτές της αντιστάσεις , η αντοχή τους είναι στα 0,5W κατανάλωσης. Οι τάσεις που χρησιμοποιούμε στις ανόδους δυστυχώς δεν μας επιτρέπουν την χρήση τους.

Η τροφοδοσία αλλά και οι πηγές ρεύματος ,στα δύο διαφορικά του σχήματος 7,ήταν στην ίδια γραμμή και αυτό εξανάγκαζε την ρύθμιση τους ταυτόχρονα. Τα προβλήματα που παρουσίαζαν ήταν τόσο στην δυσκολία της ρύθμισης της ανόδου στο στάδιο εισόδου , διότι επηρεαζόταν από την τάση της καθόδου του δεύτερου διαφορικού (DC ζεύξη)όσο και της αστάθειας λόγω των πηγών ρεύματος. Οι πηγές ρεύματος είχαν φτιαχτεί με τα IRF710, όμως όπως φαίνεται και από τις χαρακτηριστικές τους (ειδικά για το διαφορικό εισόδου-όπου η τάση καθόδου ήταν εξίσου χαμηλή με το ρεύμα), ήταν αδύνατον να πολωθούν στην περιοχή του κόρου. Έτσι τα mosfet ακόμα και όταν ρυθμιζόνταν να δίνουν το απαιτούμενο ρεύμα μετά από λίγο πολώνονταν στην τρίοδο από μόνα τους , προκαλώντας αστάθεια στο κύκλωμα. Η απαίτηση ειδικά για την πρώτη πηγή ρεύματος ήταν, κάποιο ημιαγωγό στοιχείο που να μπορεί να πολωθεί στον κόρο στα 1,4Volt-6mA. Η αγορά σε λιανική τέτοιων στοιχείων είναι δυστυχώς πολύ δύσκολη. Όσα στοιχεία και αν δοκιμάστηκαν για αυτή την λειτουργία βρέθηκαν ακατάλληλα. Όλα τα μοντέλα 2SK* που θα μπορούσαν να βοηθήσουν δεν υπήρχαν στην αγορά . Σαν μόνη λύση απόμεινε η αυτοπόλωση με αντίσταση καθόδου. Πολύ απλά ,τοποθέτηση μιας αντίστασης στην κάθοδο , που στην προκειμένη περίπτωση μπορούσε να είναι και μεταβλητή. Ο κόπος και ο χρόνος που εξοικονομείς είναι τρομακτικά μεγάλος.Το πρόβλημα όμως δεν ήταν μόνο η περιοχή της πόλωσης αλλά και ο χρόνος απόκρισης και λειτουργίας στο κάθε στοιχείο . Στην περίπτωση των λυχνιών ,που υπάρχει χρόνος θέρμανσης τους μέχρι να λειτουργήσουν σε σταθερή κατάσταση ,επηρεάζουν άμεσα και την λειτουργία των στοιχείων σταθερής κατάστασης. Για τις τάσεις και τα ρεύματα που απαιτούμε ,μια αντίσταση 230Ω καλύπτει τις ανάγκες της διάταξης ,ίσως και ένα τρίμερ μπορεί να γλιτώσει από πολύ κόπο (και πολλές κολλήσεις). Στην περίπτωση του δεύτερου διαφορικού όπου η τάση πόλωσης της καθόδου ανέβαινε στα 125Volt το fet δεν παρουσίαζε προβλήματα αστάθειας. Λόγω όμως της σχέσης σχεδιαστικά που είχαν οι δύο πηγές ρεύματος (όπως φαίνεται και από το τυπωμένο), κατά την εφαρμογή του σήματος από την γεννήτρια σήματος , οι τάσεις πόλωσης περνάν αλλοπρόσαλλες τιμές Αυξάνονταν κατά 100 V στην άνοδο της 88 πράγμα που υποδήλωνε την μείωση του ρεύματος στην λυχνία. Επηρεάζοντας βέβαια πάντα και τις τιμές της ανόδου της 12AT7. Κάτι συνέβαινε με τη διάταξη της πηγής ρεύματος και επιτέλους μετά από πολλές προσπάθειες διόρθωσης του , απλά αποσυνδέθηκε και η δεύτερη πηγή ρεύματος . Εν μέρει τα πρώτα προβλήματα είχαν λυθεί ,όμως η πόλωση δεν ρυθμιζότανε στις τάσεις που απαιτούσα .Η DC ζεύξη έδινε 3volt διαφορά καθόδου –πλέγματος στην μία λυχνία της διπλοτρίοδου 88 και σχεδόν μηδενική διαφορά στην άλλη (επηρεάζοντας πάντα την τάση ανόδου του πρώτου σταδίου και φυσικά το ρεύμα). Όσες εβδομάδες και αν πέρασαν προσπαθώντας να λύσω το πρόβλημα με πολλαπλούς τρόπους (ζεύξη AC , αναλογίες αντιστάσεων κ.τ.λ) το αποτέλεσμα ήταν μηδενικό , ανεξέλεγκτο κύκλωμα ,άρα μη προβλέψιμο και κορεσμένο σήμα στην έξοδο.

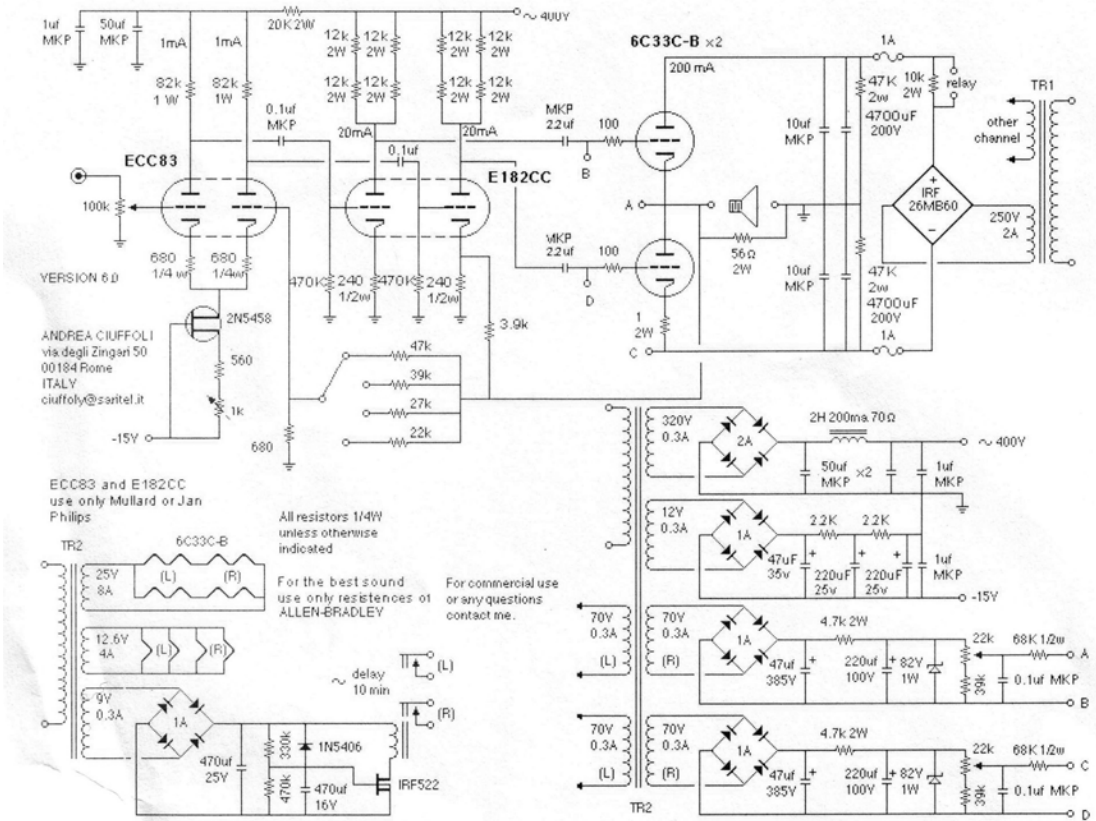
Ελέγχοντάς για άλλη μια φορά τα στοιχεία του κυκλώματος, παρατηρήθηκε ότι η ECC88 λειτουργούσε εκτός της περιοχής λειτουργίας και ότι από κατασκευής έχει κάποιες τιμές ανοχής κατά πολύ διαφορετικές στις δύο λυχνίες του κλωβού και ότι ήταν ιδανική για λειτουργία cascode. ΟΧΙ ΟΜΩΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ !!!!!

Αντικαθιστώντας την ECC88 με την ECC82 επιτέλους υπήρχε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Πάλι όμως υπήρχε πρόβλημα με τη ρύθμιση της πόλωσης στα επιθυμητά σημεία της γραφικής. Με αποτέλεσμα πολύ μεγάλη ενίσχυση ,κορεσμένο σήμα ,ακολουθία της τάσης ανόδου του διαφορικού της εισόδου με το πλέγμα του δεύτερου. Μετά από πολλές προσπάθειες να διατηρηθεί DC ζεύξη ,και έχοντας πλέον δοκιμάσει όλες τις πιθανές λύσεις ,αποφασίστηκε η λειτουργία σε AC ζεύξη. Συνδέθηκε λοιπόν τα δύο στάδια με δύο πυκνωτές 470μ/400V. Τα δύο πρώτα στάδια για πρώτη φορά λειτουργούσαν χωρίς προβλήματα .

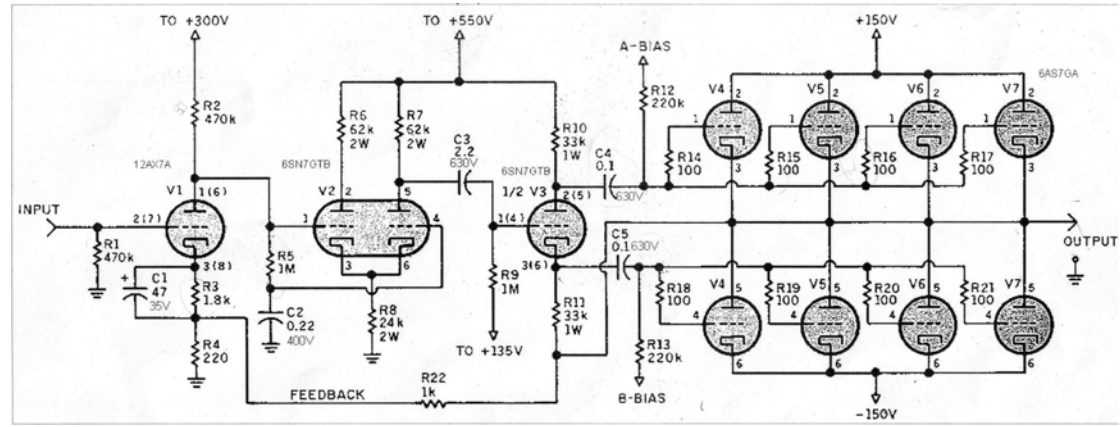
Αλλή μία απροσεξία ήρθε να προστεθεί ,είχε ξεχαστεί το γεγονός ότι το σήμα της γεννήτριας ήταν ισορροπημένο ,κάτι που δεν ταυτίζεται με το πραγματικό σήμα .Δηλαδή στην είσοδο του ενισχυτή το ένα πλέγμα είναι γειωμένο ενώ το άλλο δέχεται το σήμα , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7. Το αποτέλεσμα ήταν, όπως αναμενόταν, ότι η ενίσχυση της τάσης στο διαφορικό της εισόδου να έχει μια διαφορά 40V μεταξύ των ανόδων, με την μία άνοδο να μην παρουσιάζει σχεδόν καθόλου σήμα. Δυστυχώς αυτή η διαφορά δεν γινόταν να αντισταθμιστεί στο δεύτερο διαφορικό ενισχυτικό στάδιο και αυτό γιατί η αντίσταση καθόδου δεν μπορούσε να πάρει πολύ μεγάλη τιμή. Απαιτούνταν λοιπόν η χρήση μιας μορφής διαχωριστή φάσης. Ένας διαχωριστής στην είσοδο θα έλυνε όλα τα προβλήματα όμως , δεν υπήρχαν ούτε τάση ούτε χώρος στο σασί. Εξαναγκαστικά έπρεπε να φτιαχτεί ένας διαχωριστής φάση στο πρώτο ή στο δεύτερο στάδιο.Ανατρέχοντας σε πολλά σχέδια ενισχυτών παρατήρησα πολλές διατάξεις διαχωριστών.Πολλά από αυτά τα σχέδια αρουσιάζονται στα σχήματα 14,15, 16,17 , όπως αυτά του Andrea Ciuffoli. Οι περισσότερες διατάξεις δοκιμάστηκαν αλλά δεν έδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα.Τελικά σαν καλύτερη εφαρμογή αποδείχθηκε ο διαχωριστής φάσης του Schmitt (στο στάδιο εισόδου) όπως θα παρουσιαστεί και στο τελικό σχέδιο. Ο διαχωριστής χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο στάδιο για να μπορέσει το δεύτερο στάδιο να διορθώσει πιθανές διαφορές στην ενίσχυση του σήματος.



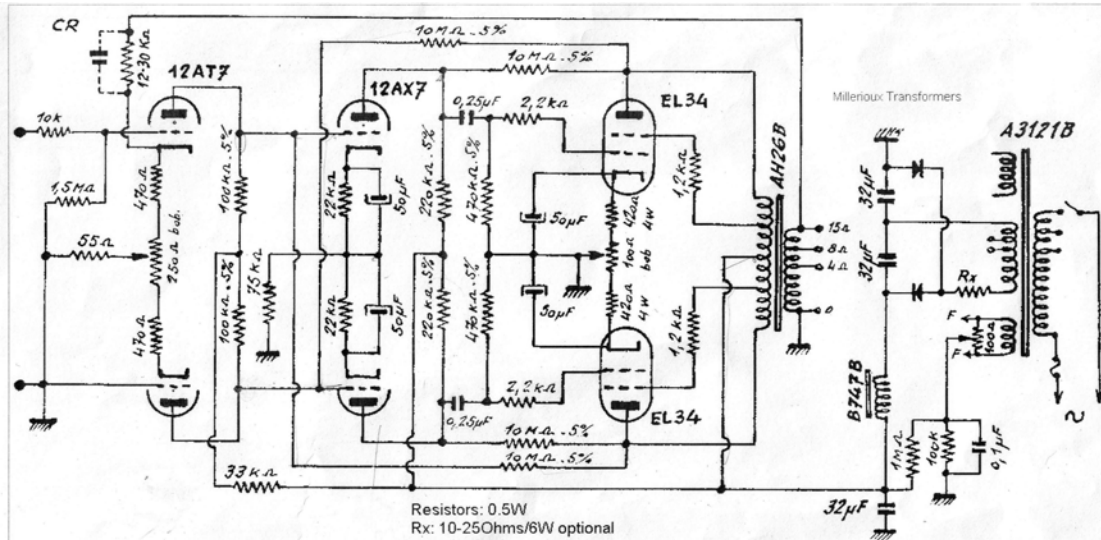
Σχήμα 15 Ενισχυτής SEPP OTL του Andrea Ciuffoli



Σχήμα 16 Ενισχυτής SEPP OTL του Andrea Ciuffoli

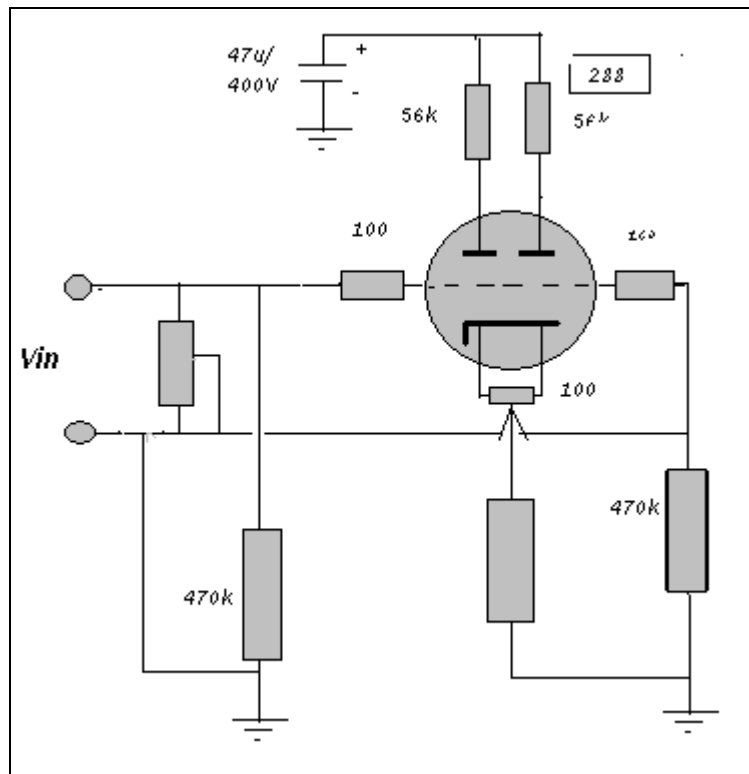


Σχήμα 17 SEPP OTL ενισχυτής



Σχήμα 18 Push-Pull OTL

Το τρίτο στάδιο, του απομονωτή, λειτούργησε άψογα από την πρώτη στιγμή. Η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης πόλωσης από τις μεταβλητές αντιστάσεις, η ρύθμιση του ρεύματος ανόδου από τις πηγές στην κάθοδο. Όλα λειτούργησαν χωρίς κανένα απολύτως πρόβλημα. Το πρόβλημα αυτή τη φορά ήταν η τάση στο νήμα θέρμανσης, που ξαφνικά άρχισε να πέφτει απότομα. Υπήρχε υπερθέρμανση στο τροφοδοτικό που τροφοδοτούσε τα νήματα της 182 και της 81. Το 317T, αναγκαζόταν να τραβήξει 0,9 A, που αν και στις προδιαγραφές αναφέρεται ότι μπορεί να τραβήξει 1,5 A χωρίς πρόβλημα, δυστυχώς στην πραγματικότητα είχε πρόβλημα. Αλλάζοντας τα νήματα και συνδέοντας τις δύο προηγούμενες λυχνίες μαζί και ενώ πλέον το 317 τραβούσε μόνο 0.6 A, άρχισαν να θερμαίνονται και τα δύο τροφοδοτικά νήματος. Έπρεπε να πέσει το απαιτούμενο ρεύμα και αυτό όπως φαίνεται από τα φύλλα προδιαγραφών γίνεται μόνο αν διπλασιασθεί η τάση τους. Αυτό και έγινε. Τα νήματα όλων των λυχνιών τροφοδοτούνταν πλέον με 12,6V, ώστε να τραβάνε ακριβώς το μισό του προηγούμενου ρεύματος. Μια μικρή έρευνα για τους σταθεροποιητές αποκάλυψε ότι αυτοί που χρησιμοποιούνται για τέτοιου είδους χρήση είναι οι LM317-2.



Σχήμα 19 Στάδιο εισόδου

Μετά από πολλούς μήνες κατάφερα να φτάσω για πρώτη φορά στο στάδιο εξόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω παράλειψης από αμέλεια της διάταξης για την τροφοδοσία του δεύτερου πλέγματος, αποφασίστηκε η λειτουργία των πεντόδων σε τριόδους. Όλη η φιλοσοφία του σταδίου εξόδου είχε πλέον αλλάξει. Η ανακάλυξη ενός άρθρου από τις σελίδες του DIY βοήθησε πάρα πολύ. Το άρθρο αυτό (OTL Amps with the EL519/509) είχε μελέτη της λειτουργίας ενός ενισχυτή, με τις ίδιες λυχνίες, σε διάφορες συνδεσμολογίες εξόδου. Μία από αυτές ήταν και συνδεσμολογία τριόδων σε τάξη AB. Τα αποτελέσματα που έδινε ήταν πολύ καλά. Το σημείο πόλωσης που έδινε ήταν όντως, πολύ γραμμικό και εφικτό με την υπάρχουσα διάταξη τροφοδοσίας, ώστε να μας δώσει ισχύ 38Watt με δύο ζευγάρια λυχνιών. Ήταν μια καλή αναφορά για πειραματισμό.

Η πόλωση που έδινε ήταν $V_p = V_{g2} = 170V$, $V_{g1} = -30V$, $I_k = 230mA$. Αυτό που παρατήρηθηκε ήταν ότι αν και η ισχύς κατανάλωσης της λυχνίας αναφέρεται στα 35watt μέγιστη για την σωστή της λειτουργία και για μέγιστη διάρκεια ζωής, στο άρθρο η ισχύς αυτή φτάνει τα 39 watt. Λειτουργούσε δηλαδή την λυχνία στο όριο. Μην δίνοντας σημασία στις μέγιστες τιμές της τάσης θεωρώντας ότι δεν ξεπερνάει τις επιτρεπτές τιμές για τις οποίες είχε σχεδιαστεί το τροφοδοτικό. Ξεκίνησε η πρώτη του λειτουργία χωρίς πολλά προβλήματα στα σήματα χαμηλής σχετικά τάσης. Το μόνο που παρουσιαζόταν ήταν υψηλή θέρμανση του τροφοδοτικού. Το πρόβλημα εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις μέγιστες τιμές της τάση εισόδου, όπου μας έδινε είσοδο στο πλέγμα της πεντόδου πάνω από 50Vp έως 80Vp. Που σημαίνει, όπως παρατηρήθηκε κατά πολύ αργότερα, ότι η τάση του πλέγματος έπαιρνε και θετικές τιμές, τραβώντας πολύ υψηλά ρεύματα. Μετά από δύο τρία λεπτά λειτουργίας το τροφοδοτικό των ανόδων, για τις πεντόδους εξόδου, κήκε. Ουσιαστικά κήκαν τα mosfet παρασέρνοντας μαζί τους πολλά στοιχεία. Από την πρώτη καταστροφή του τροφοδοτικού βγήκαν δύο συμπεράσματα. Πρώτον ότι τα στοιχεία που είχαν χρησιμοποιηθεί στη διάταξη του σταθεροποιημένου δεν ήταν υψηλής ισχύος και μπορούσαν να έχουν και αυτά βοηθήσει κατά πολύ στην καταστροφή. Δεύτερον δεν είχε γίνει αντιληπτή η αιτία καταστροφής και είχε θεωρηθεί ότι το πρόβλημα ήταν απλώς υπερθέρμανση, μιας και οι ασφάλειες δεν είχαν πάθει τίποτα (ξεχνώντας ότι ήταν των 3 A) Η προσπάθεια που γινόταν για αρκετές ημέρες ήταν στο να εξαλειφθεί το φαινόμενο της υπερθέρμανσης. Αλοιφές σιλικόνης, ψυκτικά, ψήκτρες κ.τ.λ. Όταν πλέον η

διάταξη ήταν ξανά έτοιμη , και κρατώντας για περισσότερο χρόνο αυτή την φορά ,ξανακάταστράφηκε και ξανά και ξανά (για διαφορετικό λόγο κάθε φορά, βραχυκυκλώματα, καεστραμμένες zeneg, υπερευαίσθητα mosfet). Αυτό έγινε για πάνω από 6 φορές .Όταν πλέον αποκαλύφθηκε ότι το πρόβλημα ουσιαστικά ήταν στην οδήγηση των λυχνιών(κατά πολύ μεγαλύτερη τάση στο πλέγμα από όση επέτρεπε η πόλωση) και ότι η ίδια η πόλωση δεν ήταν ανεκτή από τον τύπο κατασκευαστικά της λυχνίας, ήταν πλέον αργά για το τροφοδοτικό. Από τις πολλές αλλαγές των στοιχείων η πλακέτα είχε πλήρως καταστραφεί. Έπρεπε να λειτουργήσει το τροφοδοτικό χωρίς σταθεροποίηση. Δυστυχώς ήταν πολύ δύσκολο να πέσει η τάση στα επίπεδα που απαιτούσε η εργασία, έτσι εξαναγκαστικά θα λειτουργούσε σε κατά πολύ υψηλότερη τάση ανόδου. Αυτό που επηρεάστηκε άμεσα ήταν ο περιορισμός κατά πολύ της γραμμικής περιοχής , άρα ικρότερη απόδοση ισχύος και πολύ παραμόρφωση , τα αναμενόμενα αποτελέσματα, όπως αποδείχθηκαν και από τις μετρήσεις .

Να σημειωθεί ότι μέσα στις γενικές καταστροφές ήταν και οι πηγές ρεύματος του απομονωτή ,με αποτέλεσμα να αποκοπεί τελείως από το κύκλωμα για να μελετηθεί η λειτουργία του ενισχυτή χωρίς περαιτέρω προβλήματα από όσα ήδη υπήρχαν. Η λειτουργία χωρίς σταθεροποίηση αποκάλυψε και την αιτία ξεκάθαρα του προβλήματος . Για σήματα στην είσοδο μεγαλύτερα από 0,7V οι τάσεις πόλωσης του πλέγματος και της ανόδου αυξάνονταν κατά πολύ αντί να ελαττώνονται. Επιτέλους το προφανές 'αποκαλύφθηκε'. Έπρεπε να ελαττωθεί το κέρδος τάσης στο δεύτερο στάδιο .

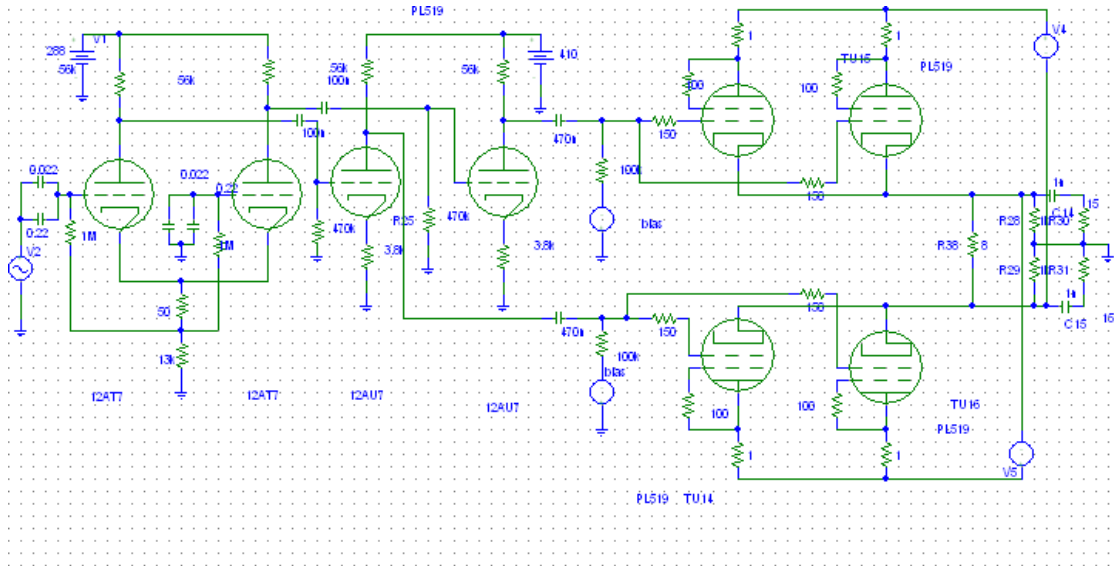
Το δεύτερο στάδιο ήταν διαφορετικό. Η ευκολία στη ρύθμιση της τάσης καθόδου και επηρεασμένη από τα σχηματικά 15-18 το διαφορικό χωρίστηκε σε δύο ανεξάρτητους ενισχυτές τάσεως , ώστε ρυθμίζοντας την αντίσταση της καθόδου να έχουμε την αναμενόμενο τάση . Αυτό είναι αποτέλεσμα της σχέσης

$$A_v = \mu * R_L / (R_L + r_p + (\mu + 1) R_k) \quad (1)$$

Η πόλωση πλέον του σταδίου εξόδου είχε ως εξής $V_a = 240V$, $V_g = -55V$, $I_k = 130mA$.

Δυστυχώς αυτή η περιοχή δεν είναι πολύ γραμμική και αναμένουμε να έχουμε υψηλές τιμές παραμόρφωσης στην έξοδο.

Το τελικό σχέδιο του ενισχυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 20. Ο πειραματισμός ήταν μια βασική διαδικασία για την μελέτη και την απόφαση για την καλύτερη τελική λειτουργία του ενισχυτή. Το μόνο σημείο στο οποίο πλέον δεν είχαν μείνει και πολλές επιλογές ήταν οι τροφοδοσίες των πεντόδων. Δυστυχώς αυτό στοίχισε και την απόδοση αλλά και την γραμμική λειτουργία του ενισχυτή . Η τελική κίνηση θα ήταν η εφαρμογή της ανάδρασης όμως η κούραση και η κακώσης που έφερε η διάταξη δεν άφηναν και πολλά περιθώρια. Η κατασκευή του ενισχυτή από την αρχή με την τελική του μορφή ήταν η προτιμότερη λύση ,ώστε να διορθωθούν και πολλά προβλήματα που παρουσιάζονταν.



Σχήμα 8 Το τελικό σχέδιο ενισχυτή

Μετά από όλα αυτά τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν ο ενισχυτής ολοκληρώθηκε για πρώτη φορά. Δεν αναμένονται τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, αλλά τουλάχιστον μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βασικό σχέδιο για ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο.

Το σημαντικότερο ίσως συμπέρασμα από αυτήν την κατασκευαστική εργασία (εκτός ότι πρέπει να διαθέσεις πάρα πολύ χρόνο) είναι, ότι στις περιπτώσεις όπου η επαφή με το αντικείμενο είναι πρωτόγνωρο, είναι προτιμότερο να ακολουθείται ο δρόμος της απλούστερης διάταξης. Στόχος δεν είναι ευθύς εξ' αρχής να φτιαχτεί το καλύτερο μοντέλο της αγοράς αλλά να αποκτηθεί εξοικείωση με το αντικείμενο.

4.5 Εναλλακτικός τρόπος σχεδίασης

Ο εναλλακτικός τρόπος σχεδίασης μιας ενισχυτικής διάταξης χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε περιπτώσεις όπου είναι γνωστή η απαίτηση κάποιου χαρακτηριστικού στην έξοδο και το χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε όλα τα απαραίτητα μεγέθη της διάταξης, ξεκινώντας από την έξοδο προς την είσοδο. Ίσως είναι και ένας τρόπος ώστε να μην γίνονται παιδαριώδη και κραυγαλέα λάθη όπως προηγουμένως. Θα χρησιμοποιηθεί η αρχικά αναμενόμενη ισχύς από τα παραπάνω των 38W σαν παράδειγμα.

Όντας γνωστή η ισχύς μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή του ρεύματος πάνω σε ένα ωμικό φορτίο όπως είναι αυτό που θεωρητικά λαμβάνουμε υπόψη μας, σαν ηχείο. Από την σχέση 2 έχουμε

$$I_{peak} = \frac{\sqrt{2 * Watt * R}}{R} \tag{2}$$

Το μέγιστο ρεύμα στην περίπτωση μας είναι 3,08 A. Υπάρχουν επίσης και κάποιοι κανόνες οι οποίοι καθορίζουν τον αριθμό των λυχνιών εξόδου που απαιτούνται ώστε να λειτουργούν με ασφάλεια και να μην μικραίνει ο χρόνος ζωής τους. Στην περίπτωση της PL519, επειδή το μέγιστο ρεύμα καθόδου που μπορεί να αντέξει είναι 0,5 A. (αν και αντέχει και ρεύματα μεγαλύτερα του 1 A), αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να διαιρέσουμε το απαιτούμενο ρεύμα της εξόδου με το μέγιστο ρεύμα., Δηλαδή στην

προκειμένη περίπτωση 6 λάμπες εξόδου ή διαφορετικά τρία ζευγάρια. Αν πάλι δεν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε τόσες λάμπες μειώνουμε τις απαιτήσεις σε ισχύ μας ή και χρησιμοποιούμε όσες θέλουμε. Στην προκειμένη περίπτωση κάτω από τέσσερις μάλλον δεν θα είναι ασφαλές για τις λάμπες. Από την σχέση 3 υπολογίζουμε την rms τιμή της τάσης εξόδου .

$$P=V_{rms} \cdot I_{rms} \Rightarrow V_{rms} = P/I_{rms} \quad (3)$$

Η rms τιμή δίνεται από την μέγιστη δια $\sqrt{2}$ $V_{rms} = 38/2,18 = 17,4V_{rms}$, $V_{peak} = 24,6 \text{ Volt}$, $V_{p-p} = 49,2 \text{ Volt}$. Δηλαδή σε κάθε κάθοδο ως προς τη γη θα πρέπει να έχουμε 24,6 Volt κυμάτωση. Αυτή η τιμή είναι εξαιρετικά σημαντική εάν δεν υπάρχουν οι χαρακτηριστικές της $V_g - I_k$ με μεταβολές της τάσης ανόδου. (οι οποίες είναι και ιδιαίτερα δύσκολες να προκύψουν από τα προγράμματα και να είναι αξιόπιστες). Οι γραφικές αυτές για την PL δεν υπάρχουν. Χρησιμοποιούμε την κυμάτωση της καθόδου στη γραφική $V_a - I_k$. Λόγω της διάταξης η V_a μεταβάλλεται με την κυμάτωση της καθόδου. Για κάθε χρονική στιγμή ισχύει $V_a(t) = V_s - V_k(t)$. Όπου V_s είναι η τάση της τροφοδοσίας.

Το σημείο πόλωσης είναι τα 170 V, 0,2 A, -30V. Το φορτίο εξόδου είναι η αντίσταση των 8Ω παράλληλα με την αντίσταση των 360 Ω, δηλαδή περίπου ίσο με τα 8Ω. Η κλίση αυτή σαν γραμμή φορτίου είναι υπερβολικά μικρή $-1/R_k = -1/8 = -0,125$. Η γραμμή φορτίου είναι $y = 8x + 168,4$ και είναι μετατοπισμένη ως προς την αρχή των αξόνων στα (168,4, 0). Υπολογίζοντας από τα σημεία πόλωσης τα δυναμικά χαρακτηριστικά της λυχνίας r_p , μ , g_m , μπορεί να υπολογιστεί εμμέσως από την σχέση του κέρδους και η τάση κυμάτωσης που απαιτείται.

$$R_p = 190 - 126,6 / 0,35 = 181$$

$$\mu = 4,35$$

$$G_m = \mu / r_p = 4,35 / 181 = 0,024 = 24 \text{ mA/V}$$

Από την σχέση για το κέρδος καθόδου

$$A_v = \frac{\mu}{\mu + 1} * \frac{R_k}{R_k + r_p / \mu + 1} \quad (4)$$

υπολογίζουμε την μέγιστη τιμή της τάσης του πλέγματος που απαιτείται για την απολαβή αυτής της τάσεως καθόδου ($A_v = 0,155$).

Γνωρίζοντας το V_p που απαιτούμε στην έξοδο και έχοντας υπολογίσει το κέρδος του σταδίου αυτού, μπορούμε να βρούμε πολύ απλά από την σχέση $A_v = V_p / V_g$, όπου V_g η μέγιστη (peak) τάση του σήματος στο πλέγμα των πεντόδων, την τάση V_g . Αυτή είναι και η τάση κυμάτωσης της ανόδου του δεύτερου σταδίου. Το κέρδος του δεύτερου σταδίου μπορεί να υπολογιστεί, είτε υπολογίζοντας πρώτα το κέρδος του σταδίου εισόδου (αφού είναι γνωστή η μέγιστη τιμή της εισόδου), είτε επιλέγοντας μια λογική τιμή κέρδους.

4.6 Αποτελέσματα

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο σύνολο της ενισχυτικής διάταξης, ξεκινώντας από το στάδιο εισόδου.

Στον πίνακα 1 έχουν συγκεντρωθεί τα αποτελέσματα των βασικών χαρακτηριστικών των σταδίων εισόδου και οδήγησης. Το συνολικό κέρδος και των δύο σταδίων, σαν σημαντικότερο χαρακτηριστικό, είναι $A_v = 110$. Η ενισχυτική ικανότητα των σταδίων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, αλλά όπως προαναφέρθηκε η επιλογή σε χαμηλά επίπεδα ήταν εξαναγκαστική ώστε να παρέχεται η τάση στην είσοδο του σταδίου εξόδου χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα.

	Είσοδος	Στάδιο οδήγησης
Αντίσταση Ανόδου	56K	56K
Τάση Ανόδου(1)	178V	250V
Τάση ανόδου(2)	168V	250V
Ρεύμα Ανόδου (1)	2.39A	2.68A
Ρεύμα Ανόδου (2)	2.57A	2.68A
Αντίσταση Καθόδου	100Ω	3.8K
Κέρδος Τάσης	20	5.5
Συντελεστής Κέρδους	60	16

Πίνακας 1 Βασικά χαρακτηριστικά των σταδίων εισόδου κα οδήγησης

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σταδίου εξόδου, όπως επιλέχθηκαν στην τελική τοπολογία.

	Στάδιο Εξόδου
Εσωτερική Αντίσταση r_a Ω	270Ω
Αντίσταση Εξόδου (θεωρητικά) Ω	27Ω
Αντίσταση Εξόδου (πρακτικά) Ω	27.5Ω
Συντελεστής Κέρδους μ	5
Κέρδος Τάσης(χωρίς φορτίο)	0.6
Κέρδος Τάσης (με φορτίο)	0.136
Συντελεστής Διαγωγιμότητας g_m mA/V	20

Πίνακας 2 Βασικά χαρακτηριστικά του σταδίου εξόδου

Όπως αποδεικνύεται και πρακτικά η τιμή της αντίστασης εξόδου είναι απαράδεκτη. Η απαίτηση για εφαρμογή αρνητικής ανάδρασης είναι πλέον ανάγκη για την καλύτερη δυνατή απόδοση του ενισχυτή. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 5 και αφορούν την εμφάνιση των αρμονικών στην έξοδο.

Ο υπολογισμός της συνολικής αρμονικής διαταραχής (THD) γίνεται με τον τύπο

$$THD = \sqrt{\sum E_n^2} / \sqrt{\sum E_n^2 + E_0^2}$$

όπου E_n είναι η τάση της αμονικής στο τετράγωνο
 $E_0 = 0$
 $n = 1..N$ (Ο αριθμός των μετρούμενων αρμονικών)

Θα πρέπει να έχουμε υπόψην μας ότι στην περίπτωση ενισχυτικής διάταξης τάξης A η επίδραση αρμονικών υψηλότερων από την τρίτη μπορεί να αγνοηθεί. Οι επιτρεπτές τιμές για αυτήν την τάξη βρίσκονται στον πίνακα 3

Αρμονική	Δεύτερη	Τρίτη	Τέταρτη
Τιμή Αρμονικής (dBm)	-30	-50	-70
Ποσοστιαία Τιμή %	3.13	0.3	0.03

Πίνακας 3 Επιτρεπτές τιμές αρμονικών στην τάξη A

Στους ενισχυτές Push-Pull η τρίτη είναι η επικρατούσα.

Στους ενισχυτές AB οι υψηλότερες αρμονικές αυξάνονται περισσότερο και οι περιπτώσεις μέχρι και την 13^η είναι αξιοπρόσεχτες και μέχρι την 25^η μπορεί να είναι εκτιμητές.

Η αντιληπτή αρμονική παραμόρφωση από το αυτί είναι στα 0.7% στην μουσική και στα 0.9% στο λόγο, σε εύρος συχνοτήτων 15000 κύκλων και με πέντοδο σαν λυχνία εξόδου. Στους 3750 κύκλους οι τιμές αυτές αντίστοιχα είναι 1.1% και 1.5%. Η ανεκτή παραμόρφωση σε αυτές τις συχνότητες είναι για τους 15KHz 1.35% στη μουσική και 1.9% στο λόγο, ενώ στα 3,75K είναι 5.6% και 8.8% αντίστοιχα. Στον πίνακα 4 έχουν συλλεχθεί διάφορες πληροφορίες για τριόδους και πεντόδους, από πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει σχετικά με την παραμόρφωση σε συγκεκριμένους τύπους λυχνιών.

Εύρος Συχνοτήτων c/s	3750	5000	7500	10000	15000
Απαράδεκτη Παραμόρφωση %					
Μουσική - Τρίοδος	14.0	8.8	4.8	3.4	2.5
- Πέντοδος	10.8	6.0	4.0	2.8	2.0
Λόγος - Τρίοδος	14.4	10.8	6.8	5.6	4.4
- Πέντοδος	12.8	8.8	6.4	4.4	3.0
Ανεκτή Παραμόρφωση %					
Μουσική - Τρίοδος	6.8	5.6	4.4	3.4	1.8
- Πέντοδος	5.6	4.0	3.2	2.3	1.35
Λόγος - Τρίοδος	8.8	7.2	4.8	3.6	2.8
- Πέντοδος	8.8	5.2	4.0	3.0	1.9
Αντιληπτή Παραμόρφωση %					
Μουσική - Τρίοδος	1.2		0.95		0.75
- Πέντοδος	1.1		0.95		0.7
Λόγος - Τρίοδος	1.4		1.15		0.9
- Πέντοδος	1.5		1.2		0.9

**Πίνακας 4 Παραμόρφωση για την τριόδο 2A3 στα 3Watt και την πέντοδο 6F6 στα 3Watt
Με βάση τα ανεκτά όρια παραμόρφωσης για τις πεντόδους και**

Θεμελιώδης Συχνότητα (KHz)	Μέτρηση σε Ισχύ (Watt)	THD(%)
5	15	4.6
5	1	2.5
3	15	1.2

Πίνακας 5 Αρμονική Παραμόρφωση

Τα αποτελέσματα του ενισχυτή δεν είναι και πολύ αισιόδοξα όσον αφορά την παραμόρφωση, όπως αποδεικνύεται από τα προαναφερόμενα. Η ανάδραση κρίνεται απαραίτητη και για την ελάττωση της παραμόρφωσης των αρμονικών που, ουσιαστικά είναι μια μορφή με την οποία παρουσιάζεται η γραμμική παραμόρφωση (όπως αναμενόταν).

Ένα καλό στοιχείο που εμφάνισε ο ενισχυτής ήταν το εύρος συχνοτήτων που κυμαίνεται από 25Hz-65KHz. Οι μετρήσεις για την απόκριση της συχνότητας πραγματοποιήθηκαν με τάση εισόδου στα 500mV και παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Οι επιβεβαίωση του εύρους συχνοτήτων έγινε και σε άλλες τιμές εισόδου στα 200 και στα 300mV.

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)	ΤΑΣΗ(V)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΤΑΣΗ(V)
10	1,50	2000	4.52
20	2.75	3000	4.52
30	3.50	4000	4.53
40	3.75	5000	4.53
50	4.00	6000	4.53
60	4.20	7000	4.53
70	4.25	8000	4.50
80	4.25	9000	4.48
90	4.30	15000	4.40
100	4.32	20000	4.30
200	4.50	25000	4.10
300	4.50	30000	4.00
400	4.50	35000	3.90
500	4.50	40000	3.80
600	4.50	45000	3.75
700	4.50	50000	3.50
800	4.50	55000	3.40
900	4.50	60000	3.35
1000	4.50	65000	3.20

Πίνακας 6. Ευρος Συχνοτήτων

Η μελέτη της παραμόρφωσης με χρήση τετραγωνικής κυματομορφής δεν έδειξε κάτι εμφανώς ανησυχητικό, και μέχρι τα στάδια ενίσχυσης της τάσεως δεν παρουσιαζόταν κάποια άλλη μορφή παραμόρφωσης.

Αλλό ένα χαρακτηριστικό που πρέπει να αναφερθεί είναι η κυμάτωση του σήματος στο κάθε στάδιο ανάλογα την τιμή της εισόδου.

Σήμα εισόδου (mV)	Ενισχυμένο σήμα στο πρώτο στάδιο (Vp)	Ενισχυμένο Σήμα στο στάδιο οδήγησης (Vp)	Εξοδος χωρίς φορτίο (Vp)	Εξοδος με φορτίο(Vp)
200	4.5	22.5	13.6	2.15
500	11.4	56	34	5.9
700	16	78	47.5	9
900	20	100	60	12.75
1000	21	110	67	15

Πίνακας 7. Κύμάτωση του σήματος

4.7 Βελτιώσεις

Από την αρχή έως το τέλος της κατασκευής του ενισχυτή οι αλλαγές που έχουν γίνει είναι πάρα πολλές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πολλά εξαρτήματα στον ενισχυτή να μείνουν σε αχρηστία. Σαν πειραματική διάταξη όμως που είναι, κάτι τέτοιο δεν μπορούσε να αποφευχθεί. Μια εξελιγμένη όμως μορφή αυτού του ενισχυτή μπορεί να γίνει και πολύ υψηλών προδιαγραφών αλλά και μια πιο εμφανίσιμη και εύχρηστη κατασκευή.

Για την διαμόρφωση αυτής πολλά μπορούν να γίνουν. Από πρακτικής απόψεως, ο μετασχηματιστής πρέπει να ξανασχεδιαστεί και να περιλαμβάνει τα τυλίγματα και για το δεύτερο κανάλι. Άλλωστε τα τυλίγματα που περιλαμβάνει αυτή τη στιγμή, για τις πηγές ρεύματος και τις υψηλές τάσεις του απομονωτή (που έχει διαγραφή από το κύκλωμα) και το νήμα του δεν χρησιμοποιούνται πλέον. Οι καλωδιώσεις του μετασχηματιστή μπορούν να πάνε από την μία πλευρά. Με μια προσεκτική σχεδίαση του τροφοδοτικού και χωρίς σταθεροποίηση στην εξόδο, που αποδείχτηκε μη αναγκαία, και για τα δύο κανάλια θα χρειαστεί μόνο η μισή πλακέτα. Προσεκτική σχεδίαση σημαίνει σωστός υπολογισμός των απαιτούμενων τάσεων. Όπως στην περίπτωση της εξόδου όπου, η τάση που χρειαζόμαστε για την σωστή πόλωση της εξόδου είναι κατά 50 Volt μικρότερη, βοηθώντας έτσι και στην ελάττωση του μεγέθους του μετασχηματιστή. Επίσης λόγω της AC ζεύξης των σταδίων δεν απαιτείται η τάση των 400V στο δεύτερο στάδιο. Και τα δύο αρχικά στάδια μπορούν να τροφοδοτηθούν με την ίδια τάση. Σωστή επιλογή των εξαρτημάτων όπως στην περίπτωση των σταθεροποιητών τάσεως (απαιτήση αντοχής σε υψηλότερα ρεύματα). Όλα τα παραπάνω βοηθούν, στην μείωση του μεγέθους του μετασχηματιστή, του ενισχυτή και του κόστους του.

Επίσης μια σωστή διάταξη των στοιχείων στον σασί, μπορεί να αποφέρει πολλά κέρδη από θερμικής απόψεως, απεμπλοκή των καλωδιώσεων ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα και αμφιβολίες για πιθανή παράλειψη ή κάποιο βραχυκύκλωμα αλλά και σε ένα σασί του ίδιου μεγέθους να τοποθετηθεί ολόκληρος στερεοφωνικός ενισχυτής.

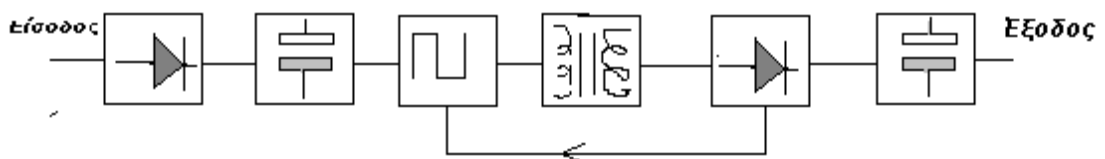
Σχεδιαστικά για τον ενισχυτή δύο είναι οι αναγκαίες κινήσεις για της βελτίωση της απόδοσης του και τη ελαχιστοποίηση των φαινομένων παραμόρφωσης. Πρώτον η μείωση των τάσεων τροφοδοσίας των ανόδων των πεντόδων των λυχνιών εξόδου. Έτσι ώστε να καταφέρει ο ενισχυτής να λειτουργεί σε γραμμικότερες περιοχές. Έχοντας σαν αποτέλεσμα την μείωση της αντίστασης εξόδου αλλά και την μείωση του ποσοστού της αρμονικής παραμόρφωσης. Δεύτερον η εφαρμογή ανάδρασης με όλα τα καλά που φέρει μαζί της. Επίσης για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης ισχύος μπορούν οι λυχνίες της εξόδου να λειτουργήσουν σαν πέντοδοι όπως και έχουν φτιαχτεί.

Γενικά οι βελτιώσεις πάνω σε διατάξεις μπορούν να γίνονται με βάση τις απαιτήσεις που έχει ο κάθε κατασκευαστής από την συσκευή. Αυτές μπορούν να βασίζονται στο μέγεθος, στην απόδοση, στην ποιότητα ήχου ή και εμφάνισης, στο κόστος και σε πολλά άλλα.

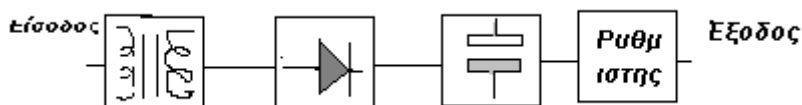
5.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα χρειάζονται συνεχές ρεύμα. Το δίκτυο παροχής ρεύματος μας παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο σκοπός του τροφοδοτικού είναι να μετατρέψει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ανόρθωση. Το ιδανικό τροφοδοτικό πρέπει να παρέχει σταθερή τάση, μηδενική κυμάτωση και απεριόριστη δυνατότητα παροχής ρεύματος ανάλογα με τις ανάγκες. Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις τύποι τροφοδοσίας, οι γραμμικοί και οι διακοπτικοί, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 1.

AC- ΜΕΤ/ΤΗΣ- ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ -ΦΙΛΤΡΟ-ΜΕΤ/ΤΗΣ-ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ-ΦΙΛΤΡΟ-ΦΟΡΤΙΟ.



AC- ΜΕΤ/ΤΗΣ-ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ-ΦΙΛΤΡΟ-ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗΣ-ΦΟΡΤΙΟ



Σχήμα 1

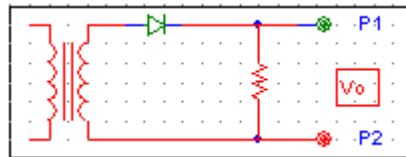
Οι διακοπτικοί είναι μικροί, χωρίς ιδιαίτερο βάρος και αποτελεσματικοί. Το σχέδιο τους είναι υψηλής τεχνικής και παράγουν άφθονο RF θόρυβο. Εν αντίθεση με τους γραμμικούς, λόγω της άμεσης εναλλαγής των 50 Hz, έχουν σαν αποτέλεσμα ένα ογκώδη μετασχηματιστή. Το σήμα αυτό ανορθώνεται από λυχνίες ή ημιαγωγούς, ομαλοποιείται από μεγάλους πυκνωτές και πιθανόν μεγάλα πηνία (choke) και αν είναι απαραίτητο σταθεροποιείται. Όλα τα παραπάνω στοιχεία κάνουν τα γραμμικά τροφοδοτικά βαριά, αναποτελεσματικά, εύκολα όμως στο σχεδιασμό και με περιορισμένο θόρυβο. Το κυριότερο είναι ότι χρησιμοποιούνται κατά κόρον στους ενισχυτές με λυχνίες.

5.2 Κυκλώματα ανορθωτών

Ο ανορθωτής διόδων αποτελεί βασικό στοιχείο των dc γεννητριών . Μετατρέπει το ημιτονοειδές σήμα σε έξοδο μιας φοράς. Παρόλο που αυτή η κυματομορφή έχει μη μηδενική μέση τιμή (υπάρχει dc συνιστώσα) , η παλλόμενη φύση της (ac συνιστώσα) την καθιστά ακατάλληλη για πηγή ,συνεχούς τάσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Η κυριότερες διατάξεις ανόρθωσης είναι :

με ανορθωτή ημίσεως (σχήμα 2) όπου ανορθώνονται μόνο οι θετικές ή αρνητικές τάσεις (ανάλογα την διάταξη) ενώ στις αρνητικές ή θετικές αντίστοιχα το



Σχήμα 2

κύκλωμα λειτουργεί ως διακόπτης .Στην περίπτωση του σχήματος 2 η τάση εξόδου δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$\text{Για } U_s > 0 \quad U_o = (U_s - U_{d1}) \cdot R / (R + r_d)$$

$$U_s < 0 \quad U_o = 0$$

όπου U_s : τάση δευτερεύοντος

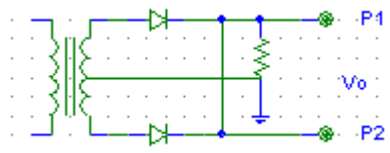
U_o : τάση εξόδου

R : αντίσταση εξόδου

r_d : αντίσταση διόδου

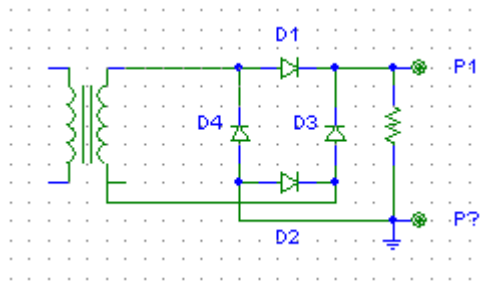
U_d : τάση λειτουργίας διόδου

με ανορθωτή πλήρους (σχήμα3) , όπου ανορθώνονται και οι δύο τάσεις .Όπως φαίνεται και στο σχήμα, όταν το ρεύμα του πρωτεύοντος είναι θετικό τότε και τα δύο σήματα είναι θετικά άρα άγει η D1 ενώ η D2 είναι σε αποκοπή. Ενώ όταν το σήμα εισόδου είναι αρνητικό τα δύο σήματα είναι αρνητικά , άρα άγει η D2 ενώ η D1 είναι σε αποκοπή .Το ρεύμα διαμέσου της R έχει πάντα την ίδια κατεύθυνση δίνοντας τάση εξόδου με την ίδια πολικότητα.



Σχήμα 3

με ανορθωτή γέφυρας (σχήμα4) .Κατά την διάρκεια των θετικών κύκλων της εισόδου η U_s είναι θετική και έτσι το ρεύμα ρέει διαμέσου της D1, D2 και R. Ενώ οι D3, D4 είναι σε αποκοπή. Κατά την διάρκεια αντίστοιχα των αρνητικών κύκλων της εισόδου η τάση του δευτερεύοντος είναι αρνητική αναγκάζοντας το ρεύμα να ρέει από τις D3 ,R και D4 ,ενώ οι D1και D2 είναι σε αποκοπή. Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι χρειάζεται τις μισές στροφές στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και αυτό είναι που την κάνει τόσο δημοφιλή.



Σχήμα 4

Στην ανόρθωση αντί για διόδους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ανορθωτρίες λυχνίες με επιλογή μεταξύ των άμεσα ή έμμεσα θερμαινόμενων λυχνιών. Όμως τα προβλήματα και οι δυσκολίες που παρουσιάζουν είναι αρκετά ώστε να μην προτιμούνται αντί των διόδων. Στην περίπτωση των έμμεσα θερμαινόμενων λυχνιών μάλιστα πρέπει να τροφοδοτήσουμε και το νήμα της ανορθωτρίας με αποτέλεσμα περισσότερο όγκο εργασίας. Το μέγεθος τους είναι άλλος ένας κατασταλτικός παράγοντας. Γενικά τροφοδοτικά με λυχνίες, χρησιμοποιούν πλέον, μόνο όσοι πιστεύουν περισσότερο στην απόδοση της λυχνίας απέναντι στην καθαρότητα του ήχου σε σχέση με τους ημιαγωγούς., οι λεγόμενοι παραδοσιακοί τύποι ή αλλιώς πιουρίστες.

5.3 Φίλτρο

Το φίλτρο απαιτείται για την εξομάλυνση ή και την εξάλειψη της υπερβολικής κυμάτωσης του σήματος εξόδου του ανορθωτή, καθιστώντας το πλέον ικανό για χρήση τροφοδοσίας στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η πιο κοινή τεχνική φιλτραρίσματος χρησιμοποιεί ένα πυκνωτή που συνδέεται παράλληλα με το φορτίο

Ο πυκνωτής είναι στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να φορτιστεί και να αποδώσει αυτό το φορτίο αργότερα. Χαρακτηρίζεται από την χωρητικότητα και την τάση που καλείται να ανεχτεί. Η τάση αυτή για λόγους προστασίας λαμβάνεται (ιδιαίτερα στις υψηλές τάσεις) προσθέτοντας κάποια Volt (20-100) σε αυτή που εφαρμόζεται θεωρητικά στα άκρα του πυκνωτή. Η μεταβολή της κυμάτωσης λοιπόν καθορίζεται από την ταχύτητα φόρτισης εκφόρτισης του πυκνωτή κατά την αγωγή ή αποκοπή ρεύματος από τον ανορθωτή (διόδους). Όσο διαρκεί η παροχή ρεύματος στο φορτίο διατηρείται η τάση στα άκρα του πυκνωτή. Η αποτελεσματικότητα των φίλτρων με πυκνωτή καθορίζεται από τρεις παράγοντες.: το μέγεθος του πυκνωτή, την τιμή του φορτίου και το χρόνο μεταξύ των παλμών. Οι τρεις αυτοί παράγοντες σχετίζονται μεταξύ τους με τη σχέση της σταθεράς χρόνου $T = R \times C$. όπου :

T = χρόνος σε δευτερόλεπτα

R = η αντίσταση σε Ω

C = η χωρητικότητα σε Farad

Μικρή κυμάτωση σημαίνει ότι ο πυκνωτής εκφορτίζεται πολύ λίγο μεταξύ των κορυφών των παλμών. Η σταθερά λοιπόν χρόνου θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίοδο των παλμών. Για τους ενισχυτές ακουστικών η τροφοδοσία θεωρείται ικανοποιητική όταν η κυμάτωση βρίσκεται στο 1%. Η επιλογή λοιπόν της χωρητικότητας του πυκνωτή βασίζεται στην πιο κάτω εξίσωση.

$$C = I \cdot T / V_{p-p}$$

όπου V_{p-p} : τάση κυμάτωσης από κορυφή σε κορυφή

I : ρεύμα φορτίου σε A

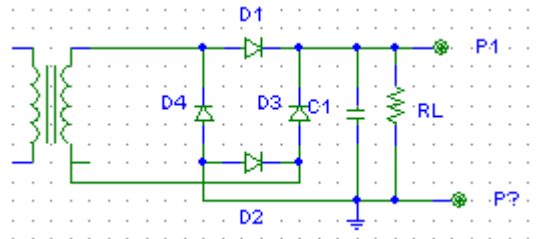
T : η περίοδος σε δευτερόλεπτα.

Παρατηρούμε από την σχέση ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο μικραίνουν οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα. Σε αυτό βασίζεται η τεχνική των διακοπτικών τροφοδοτικών, στα οποία αρχικά μετατρέπεται η συχνότητα του δικτύου σε πολύ υψηλότερη, κερδίζοντας αυτό το πλεονέκτημα. επίσης όσο μικρότερη είναι η τιμή της αντίστασης φορτίου τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η χωρητικότητα. Όμως η μεγάλη τιμή του πυκνωτή σε ένα φίλτρο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

Οι ανορθωτές δεν άγουν έως ότου η τάση έξοχου υπερβεί την τάση του πυκνωτή. Ο ανορθωτής γίνεται μη αγώγιμος ,αμέσως μετά την διέλευση της κυματομορφής από την τιμή κορυφής ,έτσι ο χρόνος αγωγής ρεύματος από τις διόδους είναι πολύ μικρός.

Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλος λόγος ρεύματος κορυφής προς την μέση τιμή του ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι το ενεργό ρεύμα του ανορθωτή είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα φορτίου. Το ενεργό ρεύμα είναι αυτό που θερμαίνει τις διόδους. Εξηγείται λοιπόν η επιλογή των διόδων με προδιαγραφές ρεύματος πολύ μεγαλύτερες από το ρεύμα που προορίζεται να παρέχει το τροφοδοτικό στο φορτίο.

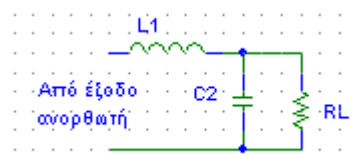
Να μην ξεχνάμε βέβαια πάντα την δυνατότητα ελάττωσης του όγκου ενός πυκνωτή με την χρήση παράλληλων μικρότερων πυκνωτών (φίλτρα RC).



Σχήμα 5. Γέφυρα με φίλτρο πυκνωτή

Άλλος τρόπος φιλτραρίσματος είναι το επαγωγικό φίλτρο με τη χρήση ενός πηνίου ή αλλιώς choke (= πνίγω την κυμάτωση). Το πηνίο έχει σαν ιδιότητα να αντιστέκεται σε οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος. Εν προκειμένω στις μεταβολές του ρεύματος που ρέει στο φορτίο. Αυτό έχει σαν συνέπεια την ελάττωση της κυμάτωσης του ρεύματος και της τάσης που ρέει στο φορτίο.

Τα επαγωγικά φίλτρα δεν χρησιμοποιούνται σε τροφοδοτικά που χρησιμοποιούν τάση δικτύου, γιατί τα choke είναι ογκώδη και με μεγάλο κόστος. Χρησιμοποιούνται όμως στα διακοπτικά , όπου η συχνότητα είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μικρότερες αυτεπαγωγές , μειώνοντας έτσι το κόστος και το μέγεθος.



Σχήμα 6. Επαγωγικό Φίλτρο

Οι τιμές στους πυκνωτές υψηλής τάσης πρέπει να υπολογίζονται με κάποια όρια ασφαλείας. Αν π.χ χρειαζόμαστε τάση 400V τότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πυκνωτή τάξεως 450V , ο οποίος θα υπερπιέσει αν η κύρια τάση αυξηθεί κατά 10%. Η λύση δίνεται με δύο τρόπους:

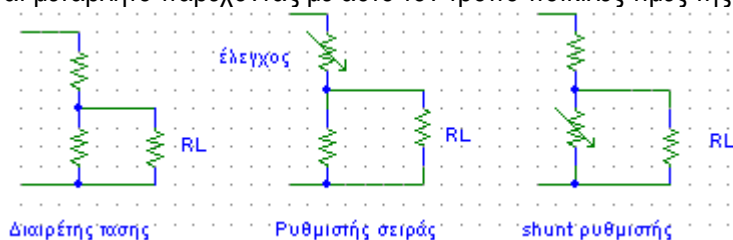
- 1) Είτε χρησιμοποιώντας υψηλότερη τάξη τάσης
- 2) Είτε συνδυάζοντας σε σειρά ισότιμους πυκνωτές μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη τάση. Επειδή όμως τα ρεύματα διαρροής δεν είναι ίσα , άρα ούτε και η τάση θα είναι. Για την εξισορρόπηση της τάσης και για να αποτρέψουμε έναν πυκνωτή να από το να ξεπεράσει την τάξη του, συνδέεται παράλληλα με μία αντίσταση και ο τελικός διαιρέτης τάση αναγκάζει της τάσης να είναι ίσες.

Καλύτερη μέθοδος είναι να χρησιμοποιηθούν χωριστά τυλίγματα υψηλών τάσεων , ανορθώσεις , εξομαλύνσεις τάσης και να συνδεθούν σε σειρά οι τελικές μεταβαλλόμενες d.c τάσεις εξόδου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή. Αυτό εξασφαλίζει ότι κάθε πυκνωτής δεν μπορεί να ξεπεράσει την εκτιμώμενη τάξη του, αλλά ο κύριος μετασχηματιστής είναι τώρα πολύ πολύπλοκος .

Ο πυκνωτής στην έξοδο του μετασχηματιστή αποκόπτει τον θόρυβο στις υψηλές συχνότητες και αποθηκεύει ενέργεια, έχοντας σαν σκοπό να αυξήσει την χωρητικότητα ώστε να καλύψει την ανεπάρκεια του μετασχηματιστή. Συνδέοντας μάλιστα δύο πυκνωτές παράλληλα όχι μόνο διπλασιάζεται η χωρητικότητα αλλά και υποδιπλασιάζεται η εμπέδηση εξόδου ,κάνοντας αμελητέες τις ταχύτητες φόρτισης εκφόρτισης

5.4 Σταθεροποιητές

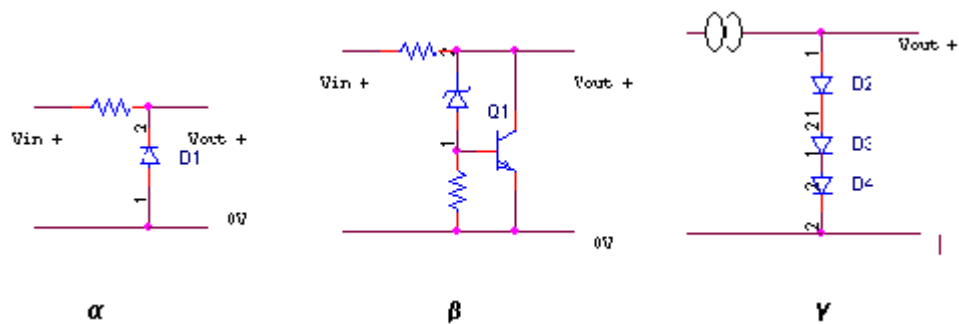
Πολλές φορές ακόμα και μετά το φίλτρο η κυμάτωση είναι αρκετά μεγάλη για να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρονικό κύκλωμα. Για την βελτίωση λοιπόν του τροφοδοτικού χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένα κυκλώματα ή διατάξεις σταθεροποίησης τάσης. Οι σταθεροποιητές έχουν καθορισμένη τάση εξόδου και εμπέδηση εξόδου που πλησιάζει το μηδέν και βασίζονται στο διαιρέτη τάσης. Είτε το επάνω ,είτε το κάτω πόδι του διαιρέτη είναι μεταβλητό παρέχοντας με αυτό τον τρόπο ποικίλες τιμές της τάσης εξόδου.



Σχήμα 7 Σχέση μεταξύ ρυθμιστή τάσης και διαιρέτη τάσης

Όταν μεταβάλλεται το επάνω πόδι ο σταθεροποιητής είναι γνωστός ως σειριακός ,επειδή το μεταβλητό τμήμα είναι σε σειρά με το φορτίο . Ενώ όταν μεταβάλλεται το κάτω πόδι ονομάζεται(αλλαγής γραμμής) shunt ,επειδή το μεταβλητό τμήμα είναι shunted (μετατόπισης) από το φορτίο .Οι SHUNT είναι αναποτελεσματικοί σε σχέση με τους σειριακούς και πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά . Για το λόγο αυτό οι σειριακοί είναι πιο διαδεδομένοι. Μια πολύ απλή διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 8^α (σταθεροποιητής ζένερ) . Τέτοια απλά κυκλώματα συνηθίζονται σε εφαρμογές χαμηλών ρευμάτων . Για μεγαλύτερα ρεύματα είναι αναγκαία η χρήση τρανζίστορ με κοινή διόδου 8β. Το προφανές πρόβλημα αυτής της διάταξης είναι ότι για να λειτουργήσει πρέπει να υπάρχει ένα συνεχές ρεύμα κατά μήκος του τρανζίστορ ,που είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να τραβήξει το φορτίο .Άρα έχουμε πολλές απώλειες. Το κύριο μειονεκτήματα τους είναι ότι παραείναι απλά , και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και όταν η διαθέσιμη τάση τροφοδοσίας είναι λίγο μεγαλύτερη από την απαιτούμενη τάση εξόδου. Δυστυχώς όμως οι κοινές διόδους και οι Zener είναι ηλεκτρικά θορυβώδης. Προκαλώντας έτσι προβλήματα πικαρίσματος στην έξοδο. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να ελαττωθεί προσθέτοντας ένα μικρό ESR πυκνωτή παράλληλα τους. Για εφαρμογές που απαιτείται μόνο μια χαμηλή τάση , η πραγματική της τιμή δεν είναι τόσο σημαντική όσο το χαμηλό επίπεδο θορύβου. Μια απλή διάταξη είναι σε σειρά διόδους πυριτίου όπως στο σχήμα 8γ. Κάθε μία από αυτές έχει μια πτώση τάσης περίπου 0,6V.Αθροιστικά όλες μαζί δίνουν τάση εξόδου 1,8 V.

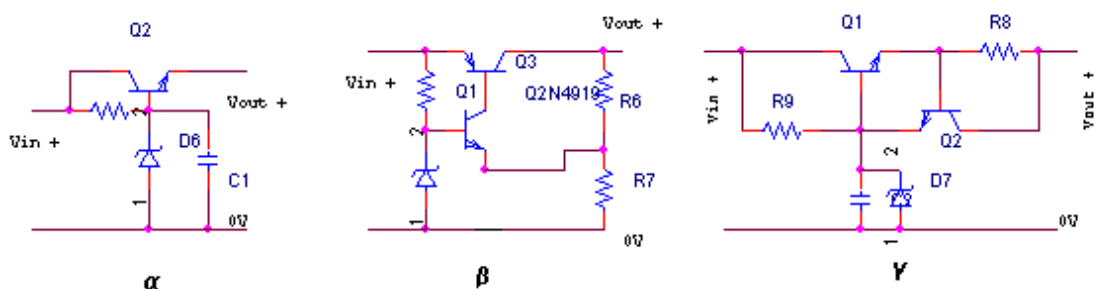
Το πρόβλημα με τη διάταξη shunt είναι το μεγάλο ρεύμα που τραβάει. Όταν λοιπόν ενδιαφερόμαστε για πολύ μεγάλα ρεύματα όπου οι απώλειες είναι πολύ μεγάλες, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούμε σειριακή διάταξη. Στο σχήμα 9 παρουσιάζονται κάποιες απλές διατάξεις. Στο 9^α (σταθεροποιητής ζένερ με ενίσχυση) βρίσκεται μια σταθερή πηγή τάσης, στην οποία ο ακόλουθος εκπομπού έχει συνδεθεί ώστε να αποδώσει μια τάση εξόδου σε μια χαμηλή εμπέδηση εξόδου.



Σχήμα 8. Απλές διατάξεις ρύθμισης shunt.

Η διόδος χρησιμοποιείται για να σταθεροποιεί την τάση βάσης του τρανζίστορ ισχύος το οποίο ονομάζεται τρανζίστορ διέλευσης σειράς. Αν υπάρχει μια λογικά σταθερή τάση βάσης –εκπομπού, συνήθως 0,7 V στο τρανζίστορ διέλευσης σειράς, τότε λογικά και η τάση του εκπομπού που είναι και η τάση του φορτίου θα παραμείνει σταθερή.

Το πρόβλημα της διάταξης αυτής είναι ότι για να λειτουργήσει πρέπει η τάση εισόδου να ξεπεράσει την τάση εξόδου κατά τάση, ώστε το ρεύμα που περνάει διαμέσου της $R1$, να παρέχει το απαραίτητο ρεύμα βάσης για το $Q1$ και αρκετό ρεύμα διάμεσου της διόδου ώστε να φτάσει την τάση αναφοράς. Η πρακτική έχει δείξει ότι η αντίσταση αυτή δεν πρέπει να είναι τόσο μικρή. Σε ένα καλοσχεδιασμένο σταθεροποιητή όπως της κλάσης των 78XX IC, η απαιτούμενη αυτή τάση είναι 2V. Ανάλογα λοιπόν με την σχεδίαση αυτή, ή drop-out όπως παρουσιάζεται στα φύλλα των σχεδιαστών, τάση αλλάζει. Αυτή η τάση μπορεί να μειωθεί αντιστρέφοντας την πολικότητα του τρανζίστορ όπως στο σχέδιο 9.β, ώστε το απαιτούμενο ρεύμα βάσης να έρχεται από τα 0V. Αυτή η διάταξη δουλεύει αρκετά καλά, αν εξαιρεθεί ότι η εμπέδηση εξόδου του τροφοδοτικού είναι αρκετά μεγαλύτερη, εκτός και αν υπάρχει ικανοποιητικό κέρδος στην αρνητική ανάδραση. Σε αυτό το σημείο το $Q1$ άγει και τροφοδοτεί με ρεύμα τη βάση του $Q3$ έως ότου η τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος της $R3$ πλησιάσει την τάση της βάσης του $Q1$ τότε και τα δύο τρανζίστορ αποκόπτονται. Σε συνδυασμό με ένα τελεστικό ενισχυτή αυτή η διάταξη μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλή απόδοση.



Σχήμα 9. Απλές διατάξεις σταθεροποιητών σειράς

Η χρήση ολοκληρωμένων σταθεροποιητών τάσεως επιτρέπει τη κατασκευή μικρών αξιόπιστων σταθεροποιημένων τροφοδοτικών (σειριακών ή παράλληλων σταθεροποιητών τάσεως ή ρεύματος ή ακόμα και διακοπτικών). Τα φύλλα δεδομένων των στοιχείων βοηθούν στην επιλογή του κατάλληλου τύπου σταθεροποιητή για την επιθυμητή λειτουργία.

Οι παρακάτω τύποι ολοκληρωμένων (IC) σταθεροποιητών τάσεως είναι διαθέσιμοι:
 τριών ακροδεκτών και καθορισμένης (fixed) τάσης εξόδου
 καθορισμένης πολικότητας και μεταβλητής εξόδου
 γενικής μορφής
 διπλής εξόδου

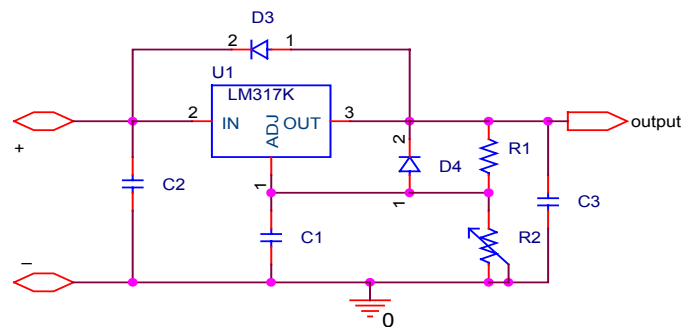
Στην πραγματικότητα η ταξινόμηση περιλαμβάνει μόνοκαθορισμένης τάσης και μεταβλητής τάσης

Από τα φύλλα προδιαγραφών πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας τις επιτρεπές τιμές απωλειών, μέγιστου ρεύματος φορτίου, μέγιστης τάσης εισόδου, τιμές εισόδου του φορτίου του σταθεροποιητή, ρεύματος ηρεμίας, απόρριψη κυμάτωσης τάσης, το κόστος και η ευκολία χρήσης.

Τα ολοκληρωμένα έχουν την ίδια συμπεριφορά λειτουργίας όπως τα διακριτά ισοδύναμα του. Από την άλλη πάλι μπορεί να έχουν τελείως διαφορετική σχεδίαση. Για να επιλέγει κάποιος από τους υπάρχοντες τύπους πρέπει πρώτα να έχουν υπολογιστεί όλα τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό. Τα ολοκληρωμένα τριών ακροδεκτών απαιτούν μικρό αριθμό εξωτερικών στοιχείων.

Άλλοι τύποι από την άλλη απαιτούν πολύ μεγάλο αριθμό εξωτερικών στοιχείων όπως μεγάλης ισχύος τρανζίστορ για ρεύματα που ξεπερνούν το μέγιστο ρεύμα φορτίου, ποτενσιόμετρα ή διαιρέτες τάσης που ρυθμίζουν την τάση εξόδου, πυκνωτές που απαιτούνται για την βελτίωση των χαρακτηριστικών της σταθεροποίησης, τελεστικούς ενισχυτές, εξωτερικά στοιχεία αναφοράς που υποκαθιστούν τα εσωτερικά στοιχεία αναφοράς, για να ρυθμίζουν την τάση ψηλότερα ή χαμηλότερα από τη καθορισμένη ή για βελτίωση της σταθερότητας.

Στο σχεδιασμό του τροφοδοτικού της εργασίας προτιμήθηκε το LM317T για της θετικής τάσης και το LM337T για τις αρνητικές γι' αυτό και θα αναφερθούμε εκτενέστερα στα χαρακτηριστικά και στη λειτουργία τους. Και τα δύο είναι ολοκληρωμένα τριών ακροδεκτών με μεταβλητή τάση εξόδου. Η συνήθης τοπολογία τους παρουσιάζεται στο σχήμα 10.



σχήμα 10

Το 317 παρέχει μια τάση αναφοράς μεταξύ του ακροδέκτη εξόδου (2) και του ακροδέκτη ρύθμισης (1) των 1,25V. Αυτό χρησιμοποιείται για να θέσει ένα σταθερό ρεύμα κατά μήκος του εξωτερικού διαιρέτη τάσεως που αποτελείται από τις R1 και R2 δίνοντας τάση εξόδου ίση με

$$V_o = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} R_2 \quad (1)$$

Το στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιήσει το ρεύμα που τραβάει ο ακροδέκτης Adj (1) (μέγιστο 100μΑ) και να το διατηρεί πολύ σταθερό με τις αλλαγές της γραμμής και του φορτίου. Συνήθως η τιμή (error) $I_{adj} * R_2$ μπορεί να αγνοηθεί. Για να επιτευχθεί η προηγούμενη απαίτηση πρέπει όλο το ρεύμα ηρεμίας του ρυθμιστή να επιστρέφεται στον ακροδέκτη εξόδου, επιβάλλοντας συνθήκες ρεύματος φορτίου. Αν το φορτίο είναι ανεπαρκές η τάση εξόδου θα αυξηθεί. Όποιαδήποτε αύξηση ή μείωση του ρεύματος ηρεμίας προκαλεί μεταβολή στην πτώση τάσης στην R2 που με την σειρά της θα επιδράσει στην τάση εξόδου. Το ρεύμα ηρεμίας επηρεάζεται από τη μη σταθεροποιημένη είσοδο το ρεύμα φορτίου και την θερμοκρασία. Εφόσον ο ρυθμιστής δεν έχει σταθερή τιμή εξόδου και βλέπει μόνο την διαφορά δυναμικού μεταξύ εισόδου και εξόδου, μπορούν να κατασκευαστούν τροφοδοτικά πολύ υψηλής τάσης με αναφορά προς την γη αρκεί να μην ξεπερνιέται η μέγιστη διαφορά δυναμικού που αντιστοιχεί στα 37- 40 V. Επιπλέον ρυθμίσεις επιτυγχάνονται εύκολα. Συνδέοντας μια αντίσταση σταθερής τιμής στον ακροδέκτη ρύθμισης (1) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το στοιχείο σαν σταθεροποιητή ρεύματος ακριβείας. Για να βελτιώσουμε την τοπολογία ην αντίσταση R1 πρέπει να είναι κοντά στο ολοκληρωμένο, ενώ το γειωμένο άκρο της R2 πρέπει να είναι κοντά στη γη του φορτίου και να παρέχει χειρισμό γείωσης. Η συμπεριφορά του σταθεροποιητή μπορεί να βελτιωθεί προσθέτοντας ένα πυκνωτή μεταξύ του ακροδέκτη εισόδου (2) και της γης για την σύζευξη με το προηγούμενο στάδιο 0,1 μ (C2). Έναν πυκνωτή C1 (10μF) για την

βελτίωση της απόρριψης της κυμάτωσης. Έναν πυκνωτή 1μF στην έξοδο για την βελτίωση της χρονικής απόκρισης. Οι δίοδοι που παρουσιάζονται στο σχήμα 7 είναι προστατευτικές δίοδοι η μεν D3 από βραχυκύκλωμα εισόδου και η D4 βοηθάει στην αποφόρτιση του πυκνωτή σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Το LM337T παρέχει ακριβώς τις ίδιες δυνατότητες αλλά στην αρνητική τάση. Δηλαδή τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι :

Μέγιστο ρεύμα διέλευσης – 1,5A

Διαφορά δυναμικού μεταξύ εισόδου –εξόδου από –1,2V έως-40V

Τάση αναφοράς –1,25V

Από :	Τάση (V) Ανόδου- (Καθόδου)	Ρεύμα(mA)	Απαιτούμενη τάση V από μετ/τή
Λυχνία 12AT7	288	6	--
Λυχνία E88CC	400	10	340
Λυχνία E182CC	+/- 220	20	220
Λυχνία PL519	180	1500	160
Νήμα 12AT7	6,3	320	12
Νήμα E88CC	6,3	320	12
Νήμα E182CC	6,3	640	12
Πηγές Ρεύματος	-18	6, 10	18
Νήμα PL 519	40(ac)	300	40
Bias για E182CC	90	20	90

5.5 Σχεδίαση του τροφοδοτικού

Κατά την σχεδίαση του τροφοδοτικού του ενισχυτή πρέπει να γίνουν πολλές

επιλογές και μεταξύ των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και μεταξύ των διατάξεων τροφοδοσίας μιας ηλεκτρονικής συσκευής. Ήδη στην εισαγωγή του κεφαλαίου έχουμε αναφέρει κάποιες. Θα ξεκινήσουμε την σχεδίαση του τροφοδοτικού βήμα προς βήμα.

Αρχική επιλογή είναι οι διατάξεις για όλες τις απαιτούμενες τάσεις (υψηλών και νημάτων).Όπως παρουσιάζονται και παρακάτω , όλες οι τάσεις έχουν επιλεγεί σταθεροποιημένες. Σε αυτή την επιλογή έπαιξε σημαντικό ρόλο το μεγάλο πλήθος των απαιτούμενων τάσεων. Με την καλύτερη δυνατή ελαχιστοποίηση οι τάσεις από τον μετασχηματιστή ανέρχονται στις 10. Αυτό σημαίνει πάρα πολλές συνδέσεις και πολλά στοιχεία στον αέρα. Αυξάνονται ,λοιπόν οι πιθανότητες βραχυκυκλώματος ή το μέγεθος στο σασί. Άλλος ένας σημαντικός παράγοντάς είναι το κόστος και το υπέρμετρο μέγεθος των πυκνωτών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, για την ελάττωση της κυμάτωσης της τάσης. Και αν αναλογιστεί κανείς ότι αναφερόμαστε μόνο στο ένα κανάλι, τότε ο περιορισμός του μεγέθους της διάταξης είναι σημαντικό.

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η σχεδίαση των διαφόρων σταδίων του ενισχυτή , έχουμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να ξεκινήσουμε την σχεδίαση του τροφοδοτικού. Συγκεντρώνουμε σε ένα πίνακα όλες τις τάσεις και τα ρεύματα που χρειάζονται για την λειτουργία του ενισχυτή πίνακας1 . Στην περίπτωση των ενισχυτών με λυχνίες τα πράγματα είναι λίγο πιο πολύπλοκα από ότι στους ενισχυτές με στοιχειά στερεάς κατάστασης, διότι εκτός των τάσεων πόλωσης, που είναι πολύ υψηλές απαιτούνται και οι τάσεις νήματος.

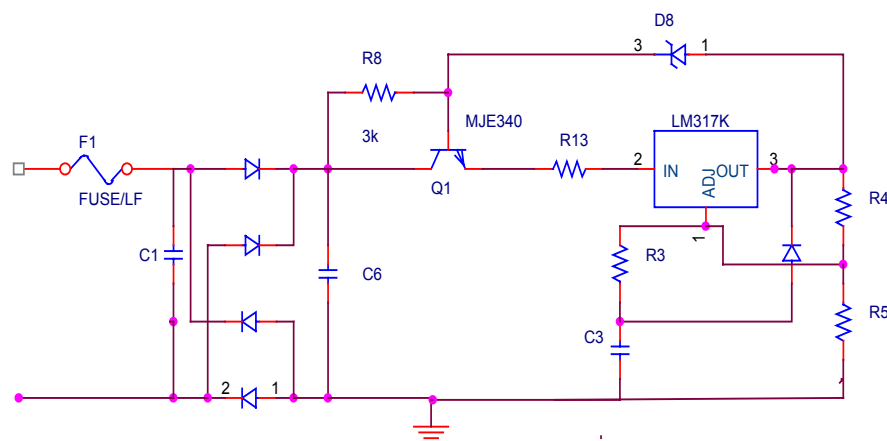
Οι τάσεις των νημάτων των λυχνιών βρίσκονται στα φύλλα προδιαγραφών από τις εταιρίες κατασκευής. Παρατηρούμε από τον πίνακα ότι η PL519 τροφοδοτεί το νήμα της με ac σήμα . Αρκετά ανακουφιστικό σκεφτόμενοι τον όγκο εργασίας και τον όγκο του τροφοδοτικού. Κύριος παράγοντας στις επιλογές μας κατά την σχεδίαση είναι η ελάττωση του όγκου εργασίας. Γι 'αυτό το λόγο το αρχικό σχέδιο μπορεί να αλλάξει ακόμα και τον τύπο των λυχνιών. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την λυχνία EL519 η οποία έχει πανομοιότυπα χαρακτηριστικά και τρόπο λειτουργίας φυσικά, με την PL519 και επομένως

μπορεί να θεωρηθεί ότι αν δεν υπάρχει η μία στην αγορά μπορεί να αντικατασταθεί με την άλλη. Η διαφορά τους βρίσκεται στην τροφοδοσία του νήματος, όπου η EL519 απαιτεί 6,3 V dc και 27 A. Αυτό σημαίνει 7V ac * 27 A, 216 VA. Η διαφορά είναι μεγάλη και σε όγκο και σε βάρος και σε κόστος.

Η κλασική διάταξη τροφοδοσίας υψηλών τάσεων των λυχνιών περιλαμβάνει μια ανορθωτική διάταξη και ένα φίλτρο RC ή RL ικανού μεγέθους για να ελαττώσει την κυμάτωση σε επιθυμητά επίπεδα. Όπως όμως έχουμε προαναφέρει ο όγκος και το κόστος του πυκνωτή ή του πηνίου μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα. Η εκτίναξη των πυκνωτών στις διατάξεις αυτού του είδους είναι συχνό φαινόμενο είτε, εάν συνδεθούν σε λάθος τάσεις (ηλεκτρολυτικοί). Είτε, λόγω της καθυστέρησης λειτουργίας που παρουσιάζουν οι λυχνίες μέχρι να θερμανθεί το νήμα και να αρχίσουν να λειτουργούν κανονικά. Αν δεν έχουμε προβλέψει ξεχωριστό διακόπτη τροφοδοσίας για τα νήματα, (έτσι ώστε πρώτα να θερμαίνουμε τις λυχνίες και μετά να δίνουμε τις τάσεις λειτουργίας), οι πυκνωτές αρχίζουν να φορτίζονται μέχρι την τάση ανοχής τους, εάν δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο με τον πυκνωτή για να κινηθεί το ρεύμα, τα δευτερόλεπτα αρχίζουν να μετράνε αντίστροφα και η έκρηξη πλησιάζει. Για αυτό δεν πλησιάζουμε ποτέ όταν συνδέουμε για πρώτη φορά το τροφοδοτικό. Όλοι αυτοί οι λόγοι μας οδηγούν στην χρήση των σταθεροποιημένων τροφοδοτικών, διότι σαν φορτίο λειτουργούν τα στοιχεία (ολοκληρωμένο, διαιρέτης τάσης) του τροφοδοτικού. Φυσικά και για το ότι η κυμάτωση μπορεί σχεδόν να εξαλειφθεί και ο θόρυβος από το τροφοδοτικό ελαττώνεται. Το αρνητικό σημείο είναι ότι η πολυπλοκότητα της κατασκευής συνιστά τυπωμένο κύκλωμα. Όσοι δεν ξέρουν από προγράμματα PCB, θα αναγκαστούν να μάθουν, εκτός και αν το κόστος δεν αποτελεί πρόβλημα. Τότε απλά πληρώνεις για την σχεδίαση και το τύπωμα.

Πολύ σημαντικό είναι, η γνώση των υπαρχόντων στοιχείων στην αγορά. Με βάση ένα σχετικό υπολογισμό των στοιχείων που χρειάζονται για την κατασκευή, ψάχνουμε για αυτά στην αγορά. Πολλές από τις θεωρητικές τιμές δεν υπάρχουν όπως και άλλα εξαρτήματα πλακέτας. Κυρίως το πρόβλημα παρουσιάζεται στους πυκνωτές όπου τα μεγέθη, η ποιότητα και οι τιμές τους ποικίλουν. Μπορεί π.χ να χρειαζόμαστε ένα πυκνωτή 100μ/ 200V το πιθανότερο είναι να βρούμε 160μ-200μ/160 ή 100μ/250, τότε πρέπει να επιλέξεις. Επίσης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον τύπο των αντιστάσεων, αν δηλαδή θα απαιτείται βατική αντίσταση. Γιατί εκτός την πιθανή καταστροφής της και άλλων εξαρτημάτων, ο προϋπολογισμένος χώρος που θεωρούμε ότι καταλαμβάνει διαφέρει σημαντικά. Με την αγορά των καλύτερων προσεγγίσεων στα στοιχεία και έχοντας πλέον τις πραγματικές διαστάσεις των στοιχείων (packages) μπορεί πλέον να σχεδιαστεί σε οποιοδήποτε πρόγραμμα χρησιμοποιείται το προς τύπωση κύκλωμα.

Η τελική διάταξη των υψηλών τάσεων είναι μια παραλλαγή του σχήματος 7 και παρουσιάζεται στο σχήμα 11

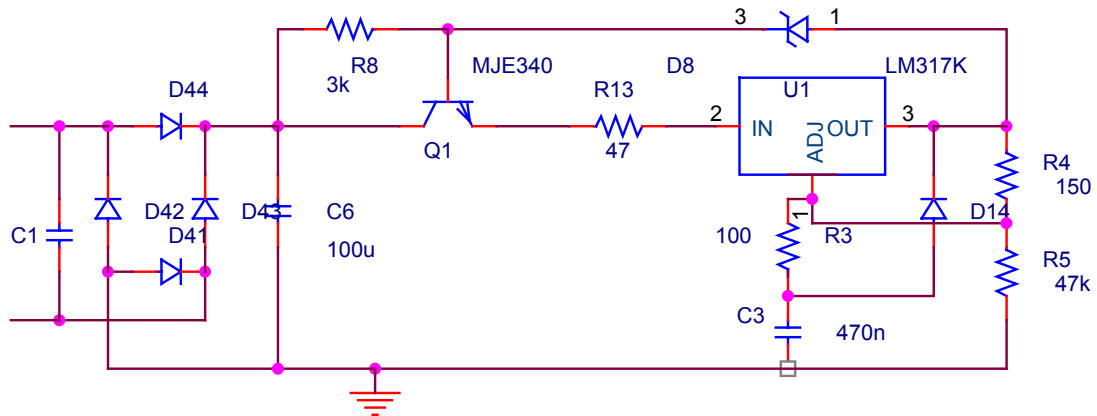


Σχήμα 11

Σε αυτή την εφαρμογή εμφανίζεται και ένα τρανζίστορ σε σειρά με τον σταθεροποιητή, με σκοπό να κρατήσει σταθερή την τάση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Η αντίσταση μεταξύ τους χρειάζεται για να

περιορίζει το ρεύμα βραχυκυκλώματος και η τιμή της κρατιέται σε μικρές τιμές για να αποφεύγεται υπερβολική πτώση τάσης.

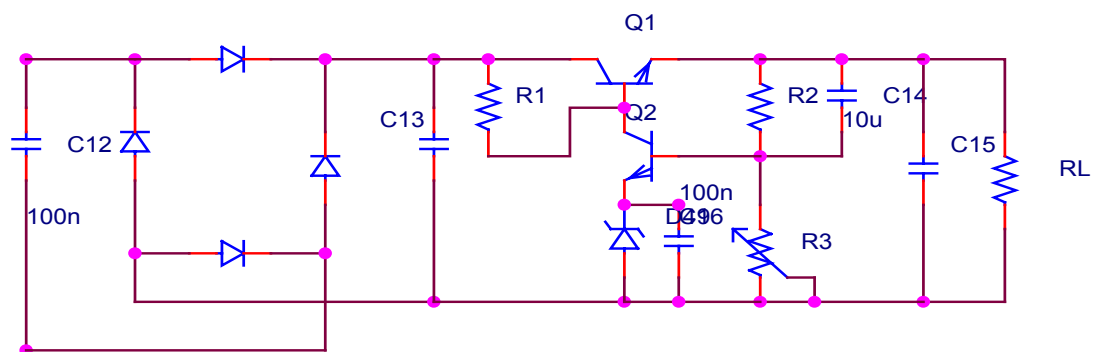
Για την σχεδίαση του τροφοδοτικού ξεκινάμε συνήθως από την επιθυμητή έξοδο προς τα πίσω. Με βάση την d.c τάση εξόδου και την σχέση (1) υπολογίζουμε τις αντιστάσεις στο διαιρέτη (R5, R4). Η αντίσταση R13 είναι πάρα πολύ μικρή συνήθως 100Ω. Ο βασικότερος υπολογισμός είναι του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή εξομάλυνσης της κυμάτωσης .



Σχήμα 12

Η αντίσταση του διαιρέτη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρές για να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερες αποκλίσεις από την επιθυμητή τιμή, αλλά ούτε και πολύ μικρές για να μην έχουμε μεγάλη διέλευση ρεύματος. Σε πολλές περιπτώσεις επειδή στην αγορά δεν υπάρχουν όλες οι τιμές των αντιστάσεων και αποκλίνουν από την πραγματική τους τιμή ,για να επιτύχουμε την τάση με ακρίβεια θα χρειαστεί να τοποθετήσουμε μια αντίσταση παράλληλα με την R4 κατάλληλης τιμής. Πριν τοποθετήσουμε οποιαδήποτε αντίσταση την μετράμε και καταγράφουμε την ακριβή της τιμή. Από εκεί και έπειτα ξεκινάμε οι προσαρμογές. Στην περίπτωση των 400V οι τιμές των ηλεκτρονικών στοιχείων αναγράφονται πάνω στο σχηματικό 12. Οι τάσεις 288, 100 λαμβάνονται από τα 400 διαδοχικά με διαιρέτες.

Άλλη μία παραλλαγή του σχήματος 9.β που έχει χρησιμοποιηθεί για τη τάση πόλωσης -70V και για την τάση ανόδου των PI519 180V είναι το σταθεροποιημένο τροφοδοτικό με ανάδραση στο σχήμα 10



Σχήμα 13

Το Q1 είναι το ένα τρανζίστορ διέλευσης σειράς και είναι ένα στοιχείο ελέγχου ενώ η δίοδος ζένερ δίνει στο κύκλωμα την τάση αναφοράς . Το Q2 είναι ενισχυτής σήματος με φορτίο την R1. Οι αντιστάσεις R2 ,R3 είναι ένας διαιρέτης τάσης που δίνει την τάση ανάδρασης , από την τάση εξόδου, στο Q2. Η τάση εκπομπού του Q2 ρυθμίζεται από την ζένερ ενώ η τάση της βάσης είναι ανάλογη της τάσης εξόδου. Αυτό επιτρέπει στο Q2 να ενισχύει οποιοδήποτε σφάλμα μεταξύ της τάσης αναφοράς και της εξόδου

Αν το φορτίο απαιτεί περισσότερο ρεύμα, πράγμα που προκαλεί μείωση της τάσης εξόδου, ο διαιρέτης στέλνει λιγότερη τάση στη βάση του Q2 . Το Q2 ανταποκρίνεται με το να άγει λιγότερο ρεύμα οπότε και θα

έχουμε και μικρότερη τάση στην R1. Η τάση της βάσης του Q1 θα αυξηθεί και το Q1 θα άγει περισσότερο, πράγμα που θα προκαλέσει την αύξηση της τάσης εξόδου. Αν καταγράψουμε όλες τις παραπάνω αλλαγές θα δούμε ότι η μεταβολή της τάσης εξόδου περιορίζεται από την ανάδραση και τον ενισχυτή σφάλματος.

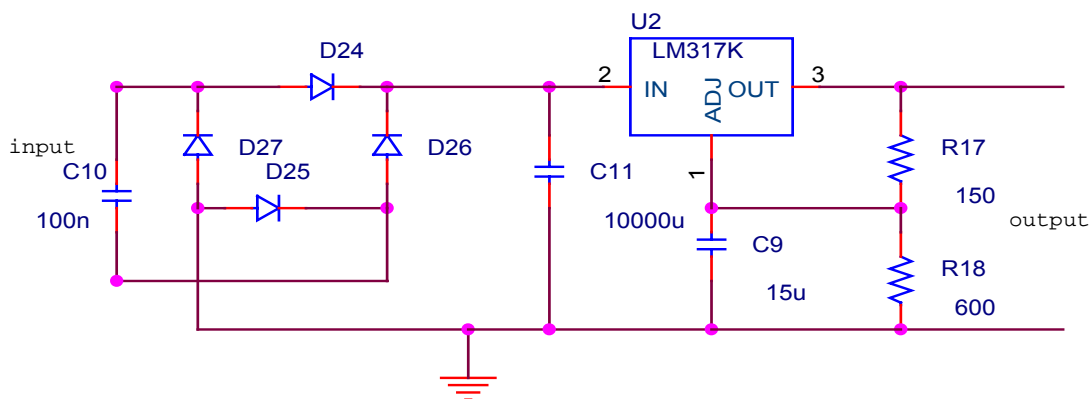
Η ικανότητα της ανάδρασης του τροφοδοτικού για να σταθεροποιεί την τάση εξόδου έχει σχέση με την ενίσχυση σφάλματος. Ένας ενισχυτής υψηλού κέρδους θα ανταποκρίνεται και στις ελάχιστες μεταβολές της τάσης εξόδου και θα παρέχει εξαιρετική σταθεροποίηση τάσης.

Οι πυκνωτές στη διάταξη της τροφοδοσίας των PL519 είναι πολύ ογκώδεις και στη πλακέτα εμφανίζονται μόνο τα πινς τους. Θα συνδεθούν σε αυτήν με καλώδια. Στο σχέδιο του ο Άλαν Κιμελ έχει σχεδιάσει floating τροφοδοτικό με πυκνωτή εξόδου 7500μ τρις φορές πάνω σε σχέση με το σταθεροποιημένο τροφοδοτικό που έχει σχεδιαστεί εδώ. Αντί για τρανζίστορ έχουν χρησιμοποιηθεί Mosfet (μεγαλύτερη αντοχή σε μεγάλα ρεύματα) όπου στις πύλες τους έχει τοποθετηθεί μια αντίσταση μικρής τιμής γύρω στα 100Ω, stopper, η οποία βοηθάει στην αποφυγή των ταλαντώσεων (τα fet ταλαντώνονται εύκολα και καταστρέφονται). Ενώ μια ζένερ μεταξύ πηγής και πύλης κρατάει τη διαφορά τάσης μεταξύ τους σταθερή και το προστατεύει από βραχυκύκλωμα.

Για τις υψηλές τάσεις, αυτές είναι οι δύο μορφές που χρησιμοποιήθηκαν και υποχρεωτικά περιλαμβάνουν στην έξοδο του μετασχηματιστή μια ασφάλεια από 0,3- 3A. Δύο διαφορετικές όχι για κάποιο λειτουργικό λόγο απλά για πειραματισμό.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση των πολύστροφων τρίμερ είναι απαραίτητη για την ρύθμιση του διαιρέτη, ώστε να βγάζει την επιθυμητή τάση εξόδου. Είναι γνωστό άλλωστε πόσο διαφέρει η θεωρία από την πράξη. Μόλις σταθεροποιηθεί η τιμή μπορούμε να αλλάξουμε με το πολύστροφο την αντίστοιχη αντίσταση. Αν και κάτι τέτοιο χρειάζεται να γίνεται πριν συνδέσουμε το τροφοδοτικό με το πραγματικό φορτίο (που είναι οι λυχνίες), έστω και αν οι πειραματικές μετρήσεις έχουν γίνει με αντίσταση φορτίο (μεγάλες μεταλλικές αντιστάσεις, ειδικές για μετρήσεις)

Η τροφοδοσία των νημάτων περιλαμβάνει δύο χωριστά τυλίγματα, ένα για τα νήματα των 12AT7 και ECC88 και ένα για την ελεύθερη (floating)ECC182. Η τοπολογία είναι αυτή του σχήματος 14 και οι υπολογισμοί των εξαρτημάτων γίνονται κατά τον ίδιο τρόπο με τα παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση τα πράγματα είναι απλά. Διότι η τάση εξόδου είναι πολύ μικρή και οι υπολογισμοί, μπορεί να γίνουν με ακρίβεια. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, επειδή η αντίσταση των 600Ω δεν βρέθηκε και χρησιμοποιήθηκε μία των 620Ω, η απόκλιση ήταν μηδαμινή.



Σχήμα 14

Το συνολικό σχηματικό διάγραμμα που σχεδιάστηκε για την κατασκευή της του τυπωμένου κυκλώματος, όπως και το pcb layout βρίσκονται στο παράρτημα Γ. Λόγω της πολυπλοκότητας και της ποσότητας των εξαρτημάτων κατά τη σχεδίαση μπορούν να γίνουν πολλά λάθη και να χρειαστεί αρκετός χρόνος. Μια παράμετρος που επηρεάζει την σχεδίαση είναι η ανάγκη ελαχιστοποίησης του μεγέθους της πλακέτας και φυσικά ολόκληρης της διάταξης. Η υπέρμετρη επιθυμία όμως για σμίκρυνση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, όπως απομόνωση των πιν σε σημεία που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία. Είναι λοιπόν ιδιαίτερα σημαντικό να βλέπουμε πρώτα την πρακτική πλευρά. Μετά από

πολυήμερη τάλαιπωρία καταφέραμε να φτιάξουμε μια πλακέτα μεγέθους 13* 21 cm. Καθόλου άσχημα αν αναλογιστούμε τον όγκο που θα μπορούσε να καταλαμβάνει μόνο τα τροφοδοτικό.

Μετά την κόλληση των εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα (την οποία μην ξεχνάτε να την ζητάτε επικασσιτερωμένη , για την ψωρίαση).Είναι έτοιμη για έλεγχο των τάσεων εισόδου και εξόδου. Τα μόνα που χρειάζεστε είναι μια γεννήτρια παραγωγής σήματος και ένα πολύμετρο ή ένα παλμογράφο. Αν δεν υπάρχουν απρόοπτα (σκασίματα πυκνωτών, καψίματα τρανζίστορ κ.τ.λ) τότε απλά ρυθμίζοντας τα trimmer, καταγράφουμε τις τιμές των σημάτων εισόδου (ac τάσεις) και υπολογίζουμε τα απαιτούμενα ρεύματα σε κάθε κύκλωμα.

Πλέον έχουμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη παραγγελία του μετασχηματιστή μας. Πρέπει να έχουμε πάντοτε υπόψη μας ότι όσο μεγαλώνει το ρεύμα τόσο μεγαλώνει και η διάμετρος του σύρματος για τα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία και του μετασχηματιστή του ενισχυτή. Είναι ένας μετασχηματιστής 700VA μόνο για το ένα κανάλι. Αρκετά μεγάλος και πολύ βαρύς. Θα μπορούσε κάποιος να τον σπάσει σε δύο μετασχηματιστές, αλλά είναι λίγο δύσκολο όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τον πίνακα μια και τα 400VA προέρχονται από τα τυλίγματα εξόδου και τα υπόλοιπα είναι γύρω στα 100VA. 500VA είναι η ανάγκες του ενισχυτή και τα υπόλοιπα 200 είναι για ασφάλεια.

Στη πλακέτα έχουν συμπεριληφθεί και οι πηγές ρεύματος που για την σταθεροποίηση του ρεύματος στις καθόδους των λυχνιών στα στάδια ενίσχυσης και οδήγησης. Τα οποία τροφοδοτούνται από τον μετασχηματιστή με 18V ac.

Επίσης η τάση διαχωριστικού πλέγματος που λαμβάνεται από το IRF820 και το οποίο χρειάζεται floating 310 V , δυστυχώς από απροσεξία είχε σχεδιαστεί να δίνεται με διαιρέτη από τα 400 V . Τώρα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξωτερικός διπλασιαστής στα 180V (ή να μην χρησιμοποιηθεί καθόλου)

6.1 Ιστορική Αναδρομή

Όλα τα μέταλλα έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στην κρυσταλλική τους δομή, με μερικά από αυτά να βρίσκονται στην επιφάνεια του μετάλλου. Περιορίζονται όμως από τις πυρηνικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Τα άτομα και τα ηλεκτρόνια παρά ταύτα, ταλαντώνονται με την παρουσία θερμικής ενέργειας. Αν λοιπόν το μέταλλο θερμανθεί επαρκώς κάποια ηλεκτρόνια μπορεί να αποκτήσουν κατάλληλη κινητική ενέργεια, ώστε να διαφύγουν από τις ελκτικές δυνάμεις των ατόμων. Σε αυτή την φυσική ιδιότητα των μετάλλων βασίστηκαν οι επιστήμονες για την κατασκευή των λυχνιών.

Το 1904 Βρετανός επιστήμονας Τζον Αμπρος Φλέμινγκ παρουσίασε την συσκευή του για την εναλλαγή του εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές. Η δίοδος αυτή είχε βασιστεί σε ένα φαινόμενο που πρώτος είχε ανακαλύψει ο Τόμας Έντισον πίσω στα 1880. Η δίοδος αυτή απαρτιζόταν από μία λάμπα πυρακτωμένου νήματος με ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο. Όταν το ηλεκτρόδιο της λάμπας θερμαινόταν τα ηλεκτρόνια της απελευθερώνονταν από την επιφάνεια του και κινούνταν προς το εσωτερικό κενό της λάμπας. Αν το επιπλέον ηλεκτρόδιο (άνοδος) ήταν θετικότερο από το νήμα, ένα συνεχές ρεύμα έρεε κατά μήκος της λυχνίας. Εφόσον η άνοδος ήταν κρύα και το νήμα ζεστό το ρεύμα μπορούσε να ρέει μόνο από το νήμα προς την άνοδο και όχι κατά την αντίθετη φορά. Με αυτόν τον τρόπο το εναλλασσόμενο σήμα μετατρέπονταν σε συνεχές. Η δίοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση αδύναμων σημάτων που παράγονταν από τον νέο, τότε, ασύρματο τηλέγραφο. Μετέπειτα και μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνεχούς σήματος από εναλλασσόμενο σε τροφοδοτικά, για ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Στα μετέπειτα χρόνια πολλοί προσπάθησαν να βελτιώσουν την δίοδο του Φλεμινγκ. Ο μοναδικός που τα κατάφερε ήταν ο Νεοϋορκέζος Λι Ντε Φόρεστ. Το 1907 πατεντάρισε μια λυχνία με τα ίδια στοιχεία προσθέτοντας ένα ακόμα ηλεκτρόδιο. Αυτό το πλέγμα (grid) ήταν ένα κυρτό σύρμα μεταξύ της ανόδου και του νήματος. Ο Ντε Φόρεστ ανακάλυψε ότι αν εφαρμόσεις το σήμα του τηλέγραφου στο πλέγμα αυτό αντί στο θερμαινόμενο νήμα, μπορούσες να πετύχεις ένα πολύ πιο ευαίσθητο ανιχνευτή σήματος. Στην πραγματικότητα το πλέγμα διαμόρφωνε το ρεύμα που έρεε από το νήμα στην άνοδο. Αυτή η συσκευή η λεγόμενη Audion, ήταν ο πρώτος ηλεκτρονικός ενισχυτής.

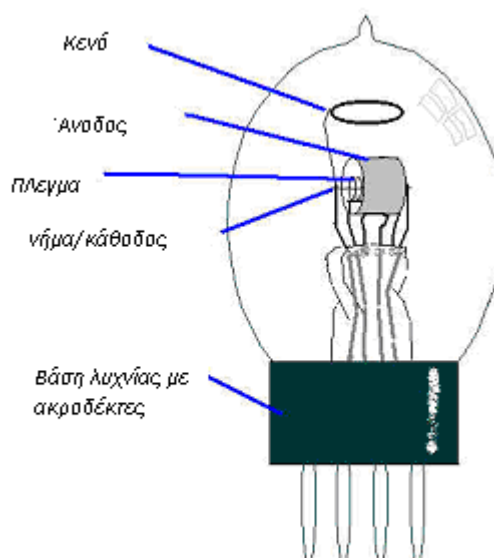
Μεταξύ 1907 και 1960, δημιουργήθηκε ένας υπερβολικός αριθμός από διάφορες οικογένειες λυχνιών. Με μερικές εξαιρέσεις οι περισσότερες λυχνίες που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν κατασκευαστεί στα 1950 και 1960. Οι λυχνίες αναπτύχθηκαν για το ραδιόφωνο, την τηλεόραση, ισχύος RF, τα ραντάρ, τους υπολογιστές και ειδικευμένες εφαρμογές. Η πλειοψηφία αυτών των λυχνιών αντικαταστάθηκε από τα τρανζίστορ και ελάχιστες κατασκευάζονται πλέον.

6.2 Μέσα σε μια λυχνία

Όλες οι μοντέρνες λυχνίες βασίζονται στην Audion, όπου μια θερμαινόμενη μεταλλική κάθοδος υπερθερμαίνει τα ηλεκτρόνια της με αποτέλεσμα την αποκολληθεί και την κίνηση τους προς το κενό της λυχνίας. Περνάνε από το πλέγμα (grid) που ελέγχει τη ροή των ηλεκτρονίων και προσκρούονται στην

ανόδου όπου και απορροφούνται. Σχεδιάζοντας σωστά την κάθοδο ,το πλέγμα και την άνοδο ,η λυχνία θα ενισχύσει το μικρό AC σήμα (σε σύγκριση , τα τρανζίστορ χρησιμοποιούν τα ηλεκτρικά πεδία πάνω σε ένα κρύσταλλο ο οποίος είναι ειδικά επεξεργασμένος-ένα όχι και τόσο εμφανές είδος ενισχυτή)

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται μια τυπική λυχνία .Είναι μια λυχνία από γυαλί με τα εξωτερικά ποδαράκια να εμφανίζονται στο κάτω μέρος της ,τα οποία συνδέονται με τα ηλεκτρόδια στο εσωτερικό της. Πριν σφραγιστεί η λυχνία από μέσα αφαιρείται όλος ο αέρας και τα πιθανά αέρια που μπορεί να περιέχει .Για την κατασκευή μιας καλής λυχνίας στο εσωτερικό της δεν πρέπει να υπάρχει πίεση μεγαλύτερη από ένα micro Torr. Όσο σκληρότερο το κενό τόσο καλύτερα θα λειτουργεί η λυχνία και τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο χρόνος ζωής της.



Σχήμα 1

6.2.α Η κάθοδος (cathode)

Σήμερα , σχεδόν όλες οι λυχνίες χρησιμοποιούν ένα από τα δύο διαφορετικά είδη καθόδου για την παραγωγή των ηλεκτρονίων

A)Το νήμα θορίου: είναι ένα νήμα βολφραμίου , παρόμοιο με αυτό της λάμπας φωτισμού, εκτός του ότι έχει προστεθεί ένα λεπτό στρώμα μετάλλου θορίου . Όταν το νήμα θερμαίνεται (2400 βαθμούς Κελσίου), το θόριο κινείται προς την επιφάνεια και εκπέμπει ηλεκτρόνια .Το νήμα με θόριο είναι πολύ καλύτερο στην εκπομπή ηλεκτρονίων από το απλό βολφράμιο.Σχεδόν όλες οι μεγάλες λυχνίες ισχύος που χρησιμοποιούνται στους ραδιοφωνικούς πομπούς είναι θορίου ,όπως και μερικές γυάλινες λυχνίες που χρησιμοποιούνται στους Hi-Fi ενισχυτές. Το νήμα θορίου έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι πολύ ανθεκτικό στις υψηλές τάσεις.

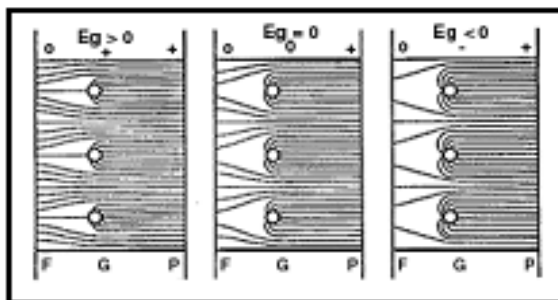
B)Το άλλο είδος καθόδου είναι το νήμα επικαλυμμένου οξειδίου. Αυτό μπορεί να είναι απλώς ένα νήμα επικαλυμμένο με μίγμα Βαρίου και Στροντίου και άλλων υποκατάστατων ,ή μπορεί να είναι “ έμμεσα θερμαινόμενη“ κάθοδος ,η οποία είναι απλώς μια λυχνία νικελίου με επικάλυψη των ίδιων οξειδίων στην εξωτερική του επιφάνεια και ένα θερμαινόμενο νήμα εσωτερικά. Η κάθοδος θερμαίνεται στους 1000 βαθμούς Κελσίου. Αυτά τα οξείδια είναι ακόμα καλύτερα στην εκπομπή των ηλεκτρονίων. Λόγω της αποτελεσματικότητας της χρησιμοποιείται,σε σχεδόν, όλες τις μικρές λυχνίες. Μπορεί όμως να καταστραφεί από πολύ υψηλές τάσεις και από βομβαρδισμό ιόντων οξυγόνου στην λυχνία.

Ο χρόνος ζωής της λυχνίας καθορίζεται από το χρόνο ζωής της εκπομπής των ηλεκτρονίων της καθόδου. Και ο χρόνος ζωής της καθόδου καθορίζεται από τη θερμοκρασία της καθόδου ,το βαθμό του κενού στη λυχνία και την καθαρότητα των υλικών της καθόδου.

6.2.β) ΑΝΟΔΟΣ (plate)

Η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο εμφανίζεται το σήμα. Επειδή η άνοδος δέχεται τη ροή των ηλεκτρονίων, μπορεί να θερμανθεί. Ειδικά στις λυχνίες ισχύος. Σχεδιάζεται λοιπόν ώστε να μπορεί να ψύχεται μόνη της, είτε ακτινοβολώντας θερμότητα δια μέσου του γυαλιού, ή με αερόψυξη ή με υδρόψυξη. Μερικές λυχνίες χρησιμοποιούν μια άνοδο φτιαγμένη από γραφίτη, διότι έχει αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και εκπέμπει πολύ λίγα δευτερογενή ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούν να υπερθερμάνουν το πλέγμα (grid) της λυχνίας και να την καταστρέψουν.

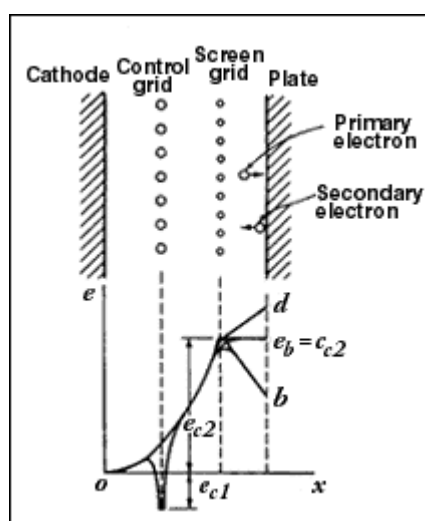
6.2.γ Πλέγμα ελέγχου (Control grid)



Σχήμα 2 Δείχνει πως η μεταβολή της τάσης στο πλέγμα ελέγχει την ροή των ηλεκτρονίων στην λυχνία

Σχεδόν σε όλες τις λυχνίες ήχου, το πλέγμα έλεγχού είναι ένα κομμάτι πεπλατυσμένου καλωδίου περιτυλιγμένο γύρω από δύο μεταλλικές στήλες. Στις μικρές λυχνίες φτιάχνεται συνήθως από χρυσό και οι δύο στήλες από χαλκό. Τα πλέγματα στις μεγάλες λυχνίες πρέπει να έχουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, γι' αυτό και συνήθως κατασκευάζονται από βολφράμιο ή από καλώδιο μόλυβδου σε μορφή καλαθιού. Το σημαντικότερο φαινόμενο που πρέπει να αποφεύγεται είναι η δευτερογενής εκπομπή ηλεκτρονίων. Αυτή προκαλείται από ηλεκτρόνια που χτυπούν πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου. Αν πολλά δευτερογενή ηλεκτρόνια φύγουν από το πλέγμα, θα χάσει τον έλεγχο της ροής των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα το ρεύμα να ρέει ούτως ή άλλως και η λυχνία αυτοκαταστρέφεται. Για το λόγο αυτό το πλέγμα κατασκευάζεται από μέταλλο που να είναι λιγότερο πρηνή στη δευτερογενή εκπομπή. Ειδικές επικαλύψεις της επιφάνειας του πλέγματος βοηθούν στην αποφυγή του φαινομένου.

6.2.δ Διαχωριστικό πλέγμα (screen grid) –τέτροδος



Η λυχνία με ένα πλέγμα (grid) λέγεται τρίοδος. Προσθέτοντας ένα πλέγμα ακόμα, μεταξύ του πλέγματος και της άνοδου, γίνεται τέτροδος. Το νέο πλέγμα βοηθάει στην απομόνωση του πλέγματος (grid) και της άνοδου. Η παρουσία του είναι καταλυτική για την ελάττωση του φαινομένου της παρασιτικής χωρητικότητας Miller ($C_{Miller} = (A+1)C_{a-g}$). Το πλέγμα επίσης προκαλεί μια επιτάχυνση των ηλεκτρονίων, φαινόμενο, που μειώνει το κέρδος της λυχνίας δραματικά. Στις λυχνίες ισχύος το διαχωριστικό πλέγμα κρατάει ρεύμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Γι' αυτό το νέο πλέγμα επικαλύπτεται με γραφίτη, μειώνοντας την δευτερογενή εκπομπή των ηλεκτρονίων και κρατώντας το πλέγμα ψυχρό.

Πολλοί μεγάλοι ραδιοηλεκτρονικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τεράστιες τετρόδους μετάλλου –κεραμικού, που είναι υψηλής απόδοσης όταν χρησιμοποιούνται σαν ενισχυτές ισχύος RF. Τέτροδοι ισχύος χρησιμοποιούν μερικές φορές στο ερασιτεχνικό ραδιόφωνο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι συνηθισμένες τέτροδοι σπάνια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ήχοσυστημάτων, εξαιτίας του φαινομένου που παρουσιάζεται στις τετρόδους από την δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “tetrode kink” και μπορεί να προκαλέσει αύξηση της παραμόρφωσης και αστάθειά αν δεν αντιμετωπιστεί σωστά μέσα στο κύκλωμα.

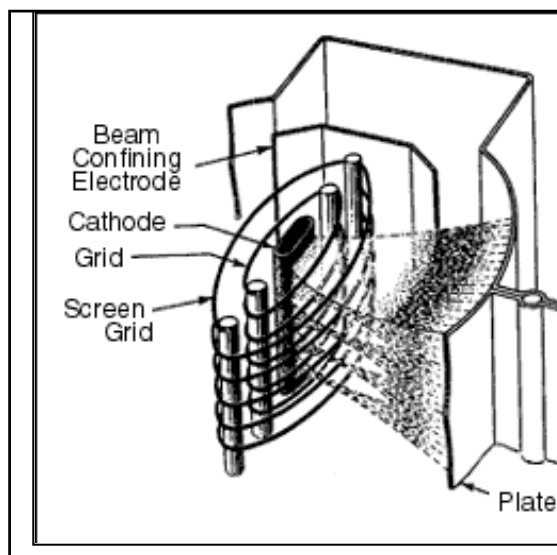
Μεγάλες κεραμικές τρίοδοι συχνά αποκαλούνται ‘radial beam tetrodes’ ή ‘beam tetrodes’, επειδή η εκπομπή των ηλεκτρονίων τους διαμορφώνει μια δέσμη μορφής δίσκου. Τα σύρματα στα πλέγματα ελέγχου και διαχωρισμού είναι ευθυγραμμισμένα, ένα ιδιαίτερο κόλπο που βελτιώνει την απόδοση.

6.2.ε Άλλα πλέγματα- πέντοδος

Προσθέτοντας ένα τρίτο πλέγμα στην τέτροδο, έχουμε την πέντοδο. Το νέο πλέγμα ονομάζεται ‘συμπιεστής’ (suppressor) και τοποθετείται μεταξύ της ανόδου και του screen grid. Έχει πολύ λίγες στροφές στο καλώδιο, εφόσον η μοναδική του δουλειά είναι να συλλέγει τα διεσπαρμένα ηλεκτρόνια της δευτερογενούς εκπομπής που αναπηδούν από την άνοδο, εξαλείφοντας έτσι το φαινόμενο της τετρόδου. Οι τέτροδοι και οι πέντοδοι τείνουν να έχουν υψηλότερη παραμόρφωση από τις τρίοδους, εκτός από ειδικά διαμορφωμένα κυκλώματα.

Υπάρχουν λυχνίες με περισσότερα από τρία πλέγματα. Η πεντα –πλεγματική μετατροπέας λυχνία, που είχε πέντε πλέγματα, χρησιμοποιούνταν ευρέως σαν μετατροπέας συχνότητας στην είσοδο των πομπών των ραδιοφώνων. Τέτοιες λυχνίες δεν βρίσκονται στην παραγωγή γιατί έχουν πλήρως αντικατασταθεί από τους ημιαγωγούς.

6.2.στ Τέτροδος με δέσμη ηλεκτρονίων



Είναι ένα ιδιαίτερο είδος τετρόδου, με ένα ζευγάρι από ανόδων beam για τη δέσμευση της δέσμης των ηλεκτρονίων σε μια στενή λωρίδα σε κάθε πλευρά των της καθόδου. Επίσης, το πλέγμα ελέγχου και διαχωρισμού έχουν τα τυλίγματα των καλωδίων τους ευθυγραμμισμένα, όπως η κεραμική τέτροδο. Αντίθετα με τις κεραμικές, τα πλέγματα είναι κρίσιμες αποστάσεις τοποθετημένα από την κάθοδο, παράγοντας το φαινόμενο της ‘εικονική κάθοδο’. Όλα αυτά μαζί προσφέρουν καλύτερη απόδοση και λιγότερη παραμόρφωση από μια κανονική τετροδο ή πέντοδο. Η πρώτη διάσημη λυχνία του τύπου αυτού ήταν η RCA 6L6, που εισήχθη το 1936. Οι σημερινές λυχνίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε ενισχυτές κιθάρας, εφόσον είναι η πιο πρόσφατη λυχνία ισχύος στους μοντέρνους high-end ενισχυτές ήχου για το σπίτι. Πλέον κατασκευάζονται μόνο σε γυαλί και όχι σε κεραμικό.

6.2.ζ) Το νήμα θέρμανσης στο εσωτερικό της καθόδου

Μια κάθοδος επικαλυμμένη με οξειδίο δεν μπορεί να θερμανθεί από μόνη της, και πρέπει να είναι ζεστή για να εκπέμψει ηλεκτρόνια. Έτσι ένα καλώδιο νήματος εισάγεται μαζί με την κάθοδο για την θέρμανση της. Η θερμάστρα πρέπει να επικαλυφθεί με ηλεκτρική μόνωση ώστε να μην καταστραφεί στις υψηλές θερμοκρασίες, καλύπτεται λοιπόν με σκόνη οξειδωμένου αλουμινίου. Μια σποραδική αποτυχία σε τέτοιες

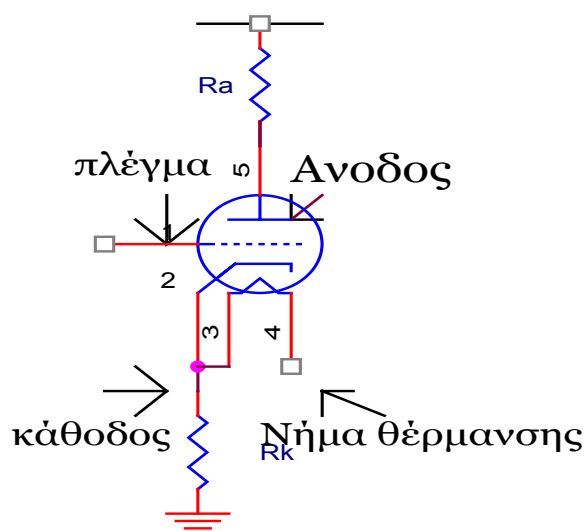
λυχνίες παρουσιάζεται στις περιπτώσεις όπου η επικάλυψη φεύγει λόγω τριβής ή σπάει , με αποτέλεσμα η θερμάστρα να μην μπορεί να αγγίξει την κάθοδο. Αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την ομαλή λειτουργία της λυχνίας. Αν μάλιστα τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο σήμα μπορεί να το εισάγει στο σήμα εξόδου. Καλής ποιότητας λυχνίες έχουν καλοφτιαγμένες και αξιόπιστες επικαλύψεις στο ηλεκτρόδιο θέρμανσης της καθόδου.

6.2.η Υλικό απορρόφησης αερίων στο κενό (getter)

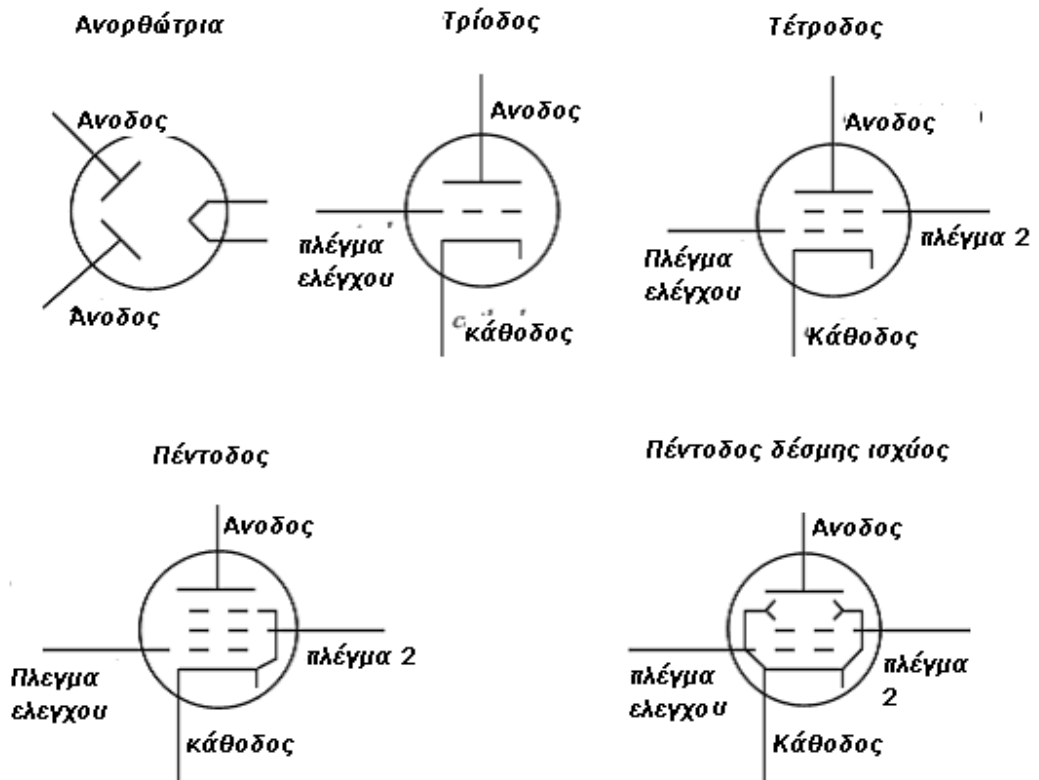
Απαιτείται , σκληρό κενό στο εσωτερικό της λυχνίας , αλλιώς δεν θα δουλέψει αποτελεσματικά. Φυσικά θέλουμε η λυχνία να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Μερικές φορές , πολύ μικρές απώλειες μπορούν να παρουσιαστούν. Ή μπορεί να μην έχουν αφαιρεθεί πλήρως τα αέρια από την λυχνία στο εργοστάσιο. Το getter έχει σχεδιαστεί για αυτά τα αέρια.

Το getter στις περισσότερες λυχνίες είναι συνήθως μια επιφάνεια πάνω στην λυχνία , που καλύπτεται με μια μικρή ποσότητα κάποιου μετάλλου (βαρίου συνήθως) το οποίο αντιδρά δραστικά με το οξυγόνο και το απορροφάει. Όταν τα αέρια αφαιρούνται από τη λυχνία και σφραγιστεί , το τελευταίο βήμα είναι να 'ανάψει ' το getter , παράγοντας με αυτό τον τρόπο μια λάμψη στο εσωτερικό της λυχνίας. Αυτό είναι το ασημένιο κομμάτι που παρατηρείται στο επάνω μέρος της λυχνία. Είναι η εγγύηση της ποιότητας της λυχνίας. Αν το αεροστεγές σφράγισμα της λυχνίας αποτύχει η λάμψη του getter θα έχει χρώμα λευκό (μετατροπή σε οξειδίο βαρίου).

Οι λυχνίες κενού κατασκευάζονται από γυάλινο ή μεταλλικό αεροστεγές κλωβό .Τα βασικά στοιχεία μέσα σε μια λυχνία είναι : η άνοδος ,η κάθοδος και το νήμα θέρμανσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κάθοδος δεν είναι ουσιαστικής σημασίας για τη λειτουργία της λυχνίας. Η λυχνία μάλιστα που δεν περιέχει κάθοδο θεωρείται άμεσα θερμαινόμενη ενώ αυτή που περιέχει θεωρείται έμμεσα θερμαινόμενη. Το νήμα θέρμανσης τροφοδοτείται με μια τάση , τέτοια , ώστε τα ηλεκτρόνια της καθόδου να μπορούν να διαφύγουν. Τα ηλεκτρόνια αυτά έλκονται από την άνοδο ,εφόσον αυτή βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με την κάθοδο. Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει κάθοδος τα ηλεκτρόνια κινούνται απευθείας στην άνοδο. Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων παρέχει το ρεύμα στη λυχνία. Κατά σύμβαση θεωρούμε ότι η κίνηση των ηλεκτρονίων προς μία κατεύθυνση προκαλεί (συνεπάγεται) ρεύμα αντίθετης φοράς . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ροή ρεύματος έχουμε μόνο όταν η άνοδος βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό από αυτό της καθόδου. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η αναπαράσταση της απλής λυχνίας και στο σχήμα 5 όλες οι προαναφερόμενοι τύποι των λυχνιών.



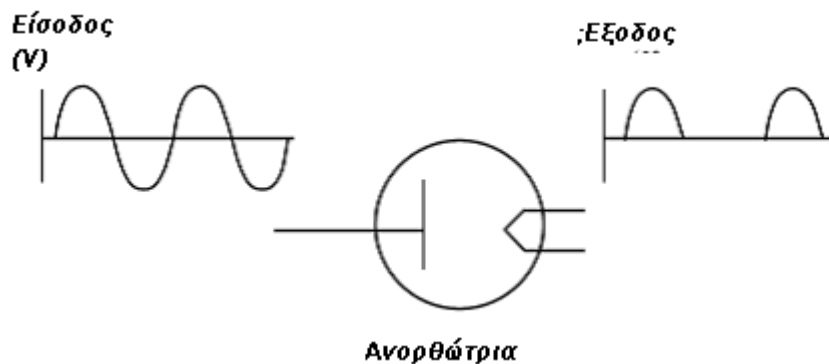
Σχήμα 4 Σχηματική αναπαράσταση απλής λυχνίας



σχήμα 5 Τύποι λυχνιών Ανορθώτρια (rectifier), τρίοδος (triode), τέτροδος (tetrode), πέντοδος (pentode), πέντοδος ισχύος δέσμης (beam pentode).

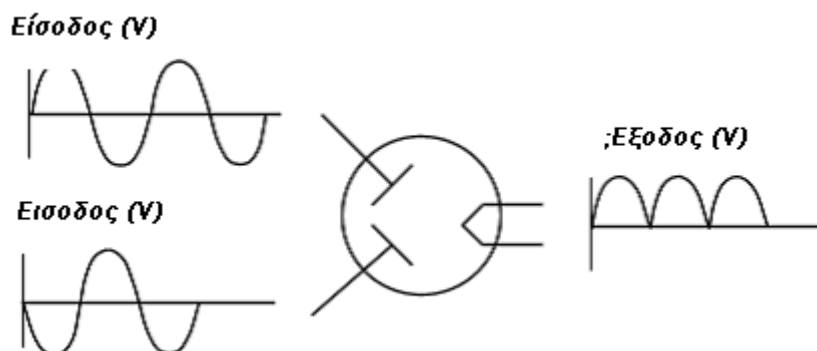
6.3 Λειτουργία λυχνίας (βασικές διατάξεις)

Η απλούστερη μορφή λυχνίας είναι η ανορθώτρια και αυτό γιατί συμπεριφέρεται παρόμοια με την δίοδο. Όταν ένα AC σήμα εφαρμόζεται στην άνοδο αυτό ανορθώνεται στο νήμα θέρμανσης. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6 Λειτουργία ανορθώτριας

Εύλογα λοιπόν χρησιμοποιείται για την ανόρθωση πλήρους σήματος όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.(διπλή ανορθώτρια). Στις δύο ανόδους εφαρμόζονται τα σήματα που έχουν διαφορά φάσης 180° τα οποία και ανορθώνονται στο νήμα. Οι ανορθώτριες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τροφοδοτικών.

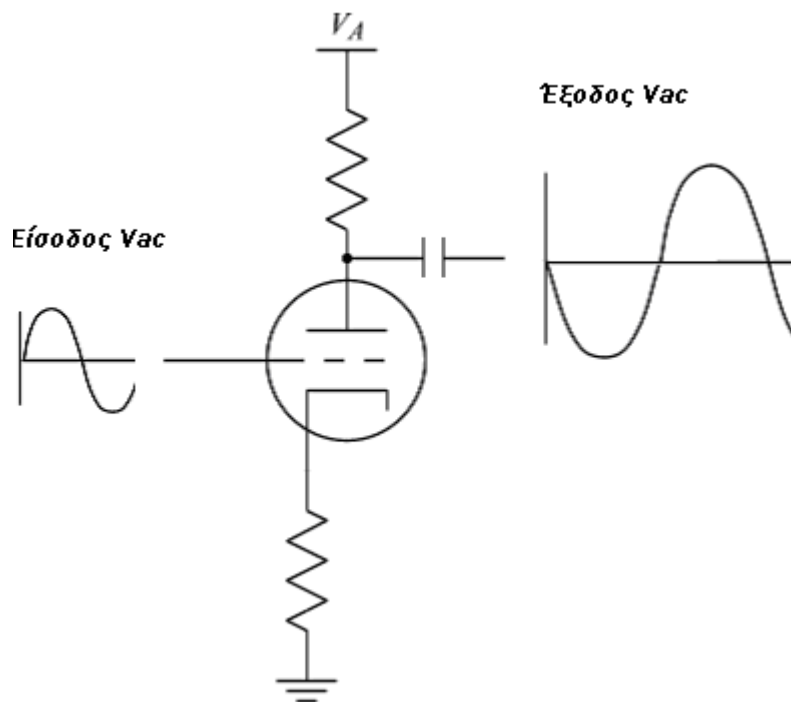


Σχήμα 7 Πλήρης ανόρθωση εναλλασσομένου σήματος

Η τρίοδος είναι μια συσκευή τριών ακροδεκτών: της ανόδου, της καθόδου και του πλέγματος ελέγχου. Στην τρίοδο το πλέγμα ελέγχου παίζει καθοριστικό ρόλο στην ροή των ηλεκτρονίων μέσα στη λυχνία. Η τάση στο πλέγμα ενισχύει ή εμποδίζει την κίνηση των ηλεκτρονίων από την κάθοδο στην άνοδο. Το νήμα θέρμανσης παραμένει στην τρίοδο και έχει σταθερή τιμή, συνήθως, 6,3 V ή 12V εναλλασσόμενης ή σταθερής τάσης ανάλογα με τον τύπο της λυχνιάς. Η DC τροφοδότηση δεν είναι και τόσο αποτελεσματική για εμπορικά τροφοδοτικά να ρυθμίζουν το AC σήμα αν αυτό εν απαιτείται. Δυστυχώς όμως και η τροφοδότηση με εναλλασσόμενο μπορεί να προκαλέσει θόρυβο όταν τα καλώδια δεν είναι εγκατεστημένα κατάλληλα. Το νήμα είναι αυτό που επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να κινούνται από την κάθοδο στην άνοδο, θερμαίνοντας τα. Αν η τάση πλέγματος είναι θετική η ροή των ηλεκτρονίων ενισχύεται. Αν όμως είναι αρνητική η ροή των ηλεκτρονίων παρεμποδίζεται.

Τέλος αν η τάση γίνει πολύ αρνητική τότε η ροή του ρεύματος σταματά, με εξαίρεση Ροής του εναπομείναντος ρεύματος διαρροής. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 5 το σήμα που λαμβάνουμε από την άνοδο έχει διαφορά φάσης με το σήμα εισόδου 180° . Η τρίοδος λειτουργεί σαν λυχνία παρεμποδίζοντας ή ενισχύοντας τη ροή του ρεύματος.

Η τέτροδος σχεδιάστηκε για την απαλοιφή της μεγάλης παρασιτικής χωρητικότητας που εμφανίζεται μεταξύ του πλέγματος και της ανόδου στην λυχνία τριόδου. Αυτή περιορίζει την λειτουργία της στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων. Στην τέτροδο προστέθηκε άλλο ένα πλέγμα που ονομάζεται screen grid. Το νέο αυτό πλέγμα διαιρεί τη χωρητικότητα του αρχικού πλέγματος ως προς την άνοδο στο μισό, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την συνολική παρασιτική χωρητικότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί πρακτικά έχουμε εν σειρά χωρητικότητες, όπου το άθροισμα τους δίνεται από τη σχέση: $C1 \cdot C2 / (C1 + C2)$. Γενικά το screen grid κρατιέται σε θετική τάση για να είναι πιο αποτελεσματική. Αυτό, διαδοχικά επιταχύνει τα ηλεκτρόνια προς την άνοδο. Ακριβώς όπως συνέβαινε με το πρώτο πλέγμα.



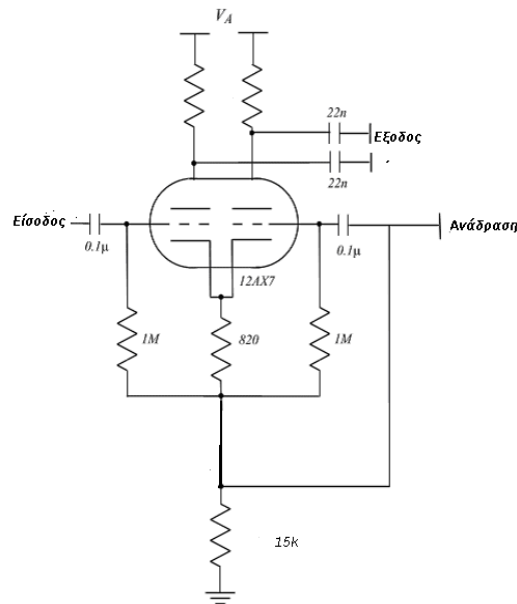
Σχήμα 8 Λειτουργία τριόδου

Η λύση όμως αυτή για την μείωση της παρασιτικής χωρητικότητας έφερε ένα νέο πρόβλημα.. Η πέντοδος σχεδιάστηκε από τη στιγμή που η τέτροδος επιτάχυνε τα ηλεκτρόνια προς την άνοδο προκαλώντας αυτό που λέμε δευτερογενής εκπομπή. Τα ηλεκτρόνια που ταξιδεύουν στο κενό μεταξύ του πλέγματος και της ανόδου ,βομβαρδίζουν την άνοδο με επαρκή ενέργεια ώστε τα ηλεκτρόνια της ανόδου να εκτοπίζονται και να εισέρχονται στο κενό της λυχνίας. Εφόσον το screen grid είναι θετικό τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έλκονται προς αυτό, προκαλώντας τη μείωση του ρεύματος ανόδου. Η λύση του προβλήματος αυτού παρέχεται από τη διάταξη της πεντόδου ,στην οποία προστίθεται άλλο ένα πλέγμα ,το λεγόμενο πλέγμα συμπίεσης (suppressor). Αυτό το πλέγμα συνδέεται εσωτερικά με την κάθοδο με αποτέλεσμα να βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό από το screen grid. Τα ηλεκτρόνια λοιπόν που προέρχονται από τη δευτερογενή εκπομπή μπλοκάρονται (απωθούνται) από το αρνητικά φορτισμένο πλέγμα παρεμποδίζοντας την έλξη τους προς το screen.

Ο διαχωριστής φάσης (phase splitter) μας επιτρέπει να έχουμε ίσα σήματα αντίθετης φάσης στο στάδιο ενίσχυσης της ισχύος . Αν και υπάρχουν πολλές τοπολογίες για διαχωριστές φάσεις ,αυτή που εικονογραφείται στο σχήμα 9 είναι η πιο κοινή ανάμεσα στους ενισχυτές κιθάρας.

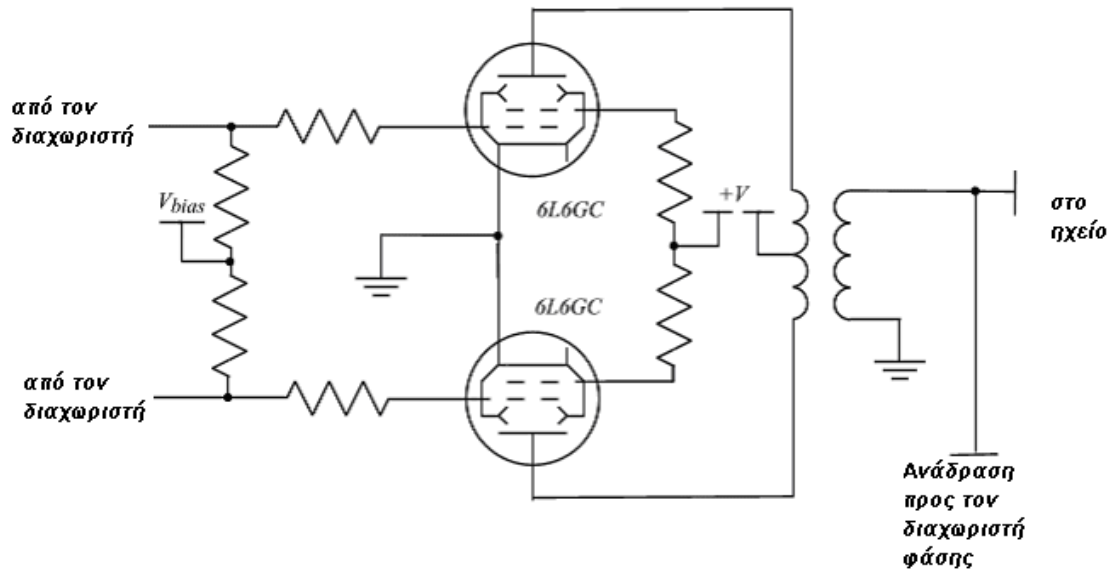
Εξετάζοντας το παραπάνω κύκλωμα , βλέπουμε κάτι παρόμοιο σε συνδεσμολογία κοινής καθόδου σε κάθε πλευρά. Αυτή η μορφή είναι γνωστή και σαν διαφορικό ζευγάρι . Το δίκτυο της αντίστασης στην κάθοδο είναι ισοδύναμο με μια πηγή ρεύματος. Το ρεύμα στην κάθοδο του διαφορικού ζευγαριού καθορίζει αρκετές ιδιότητες της διάταξης , όπως είναι το κέρδος. Οι εισοδοί στα πλέγματα είναι πολωμένοι δημιουργώντας ηλεκτρική επαφή με το κάτω άκρο της αντίστασης των 820 Ω. Η αντίσταση των 4.7 K ανοίγει δρόμο για την DC ανάδραση στη γείωση. Η ανάδραση γραμμικοποιεί το διαφορικό ζευγάρι κλείνοντας τον βρόχο γύρω από τον ενισχυτή . Ρυθμίζοντας την ανάδραση διαμορφώνεται την συνάρτηση μεταφοράς του διαφορικού ενισχυτή. Αυτό είναι η αρχή της παρουσίας και του συντονισμού ελέγχου. Αυτοί οι έλεγχοι αλλάζουν την συνάρτηση μεταφοράς του διαφορικού ενισχυτή. Όλη η διάταξη συμπεριφέρεται σαν διακόπτης ρεύματος. Η είσοδος θα επιτρέψει περισσότερο η λιγότερο ρεύμα να ρέει στην άνοδο ενώ προκαλεί τα αντίθετα στην άλλη άνοδο. Η είσοδος κατευθύνει το ρεύμα ,ενώ η ανάδραση καθορίζει πόσο ρεύμα θα καθοδηγηθεί . Κάθε άνοδος έχει σήμα το οποίο είναι 180° εκτός φάσης με το άλλο. Αυτό είναι ότι ακριβώς χρειάζεται για να παραχθεί το σήμα εισόδου για ένα στάδιο εξόδου τάξεως AB . Οι περισσότεροι διαχωριστές φάσης εξισορροπούνται όταν οι δύο αντιστάσεις ανόδου δεν είναι

ίσες. Αυτή η αντιστάθμιση έχει να κάνει με το γεγονός ότι , αν οι αντιστάσεις ανόδου είναι ίσες , τότε η έξοδος της πρώτης τριόδου είναι μεγαλύτερη από την έξοδο της δεύτερης. Ελαπώνοντας την αντίσταση της ανόδου της πρώτης λυχνίας ισοσταθμίζει το παραπάνω γεγονός. Γενικά αυτή δεν είναι μια συνηθισμένη διάταξη προς ανάλυση , εφόσον οι έξοδοι εξαρτώνται και από την είσοδο και από την ανάδραση.



Σχήμα9. Διαχωριστής Φάσης (phase splitter)

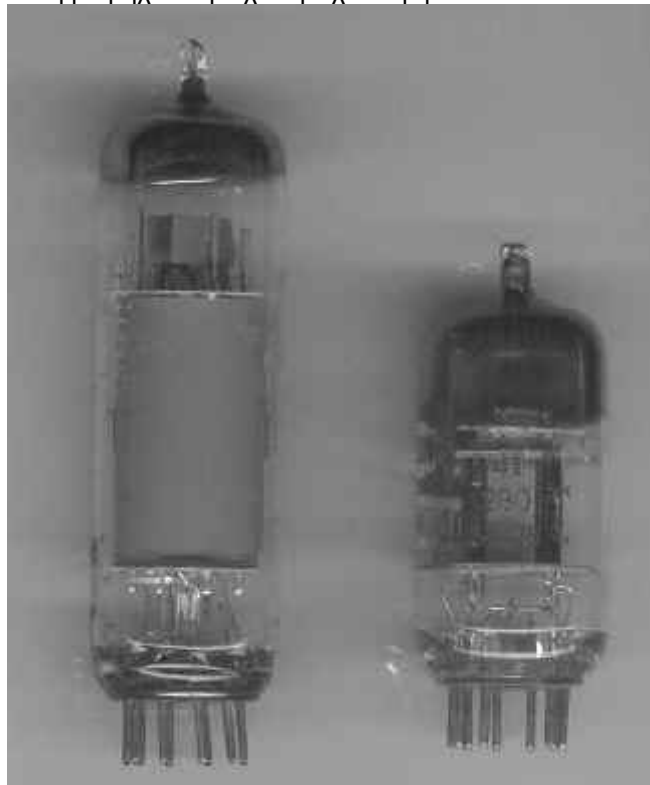
Στα στάδια των ενισχυτών ισχύος συνήθως χρησιμοποιούνται πέντοδοι η δέσμης ισχύος πέντοδοι. Στο σχήμα 10 είναι μια γενική μορφή ενός κοινού AB ή αλλιώς push –pull ενισχυτή. Η μία πέντοδος άγει ενώ η άλλη όχι και αντίθετα. Η έξοδος της ανόδου κάθε πέντοδου οδηγεί ένα μετασχηματιστή για να μετασχηματίσει την υψηλή τάση σε ρεύμα για τα ηχεία. Το πλέγμα ελέγχου μπορεί να είναι πολωμένο μέσω ενός μεταβλητού η σταθερού μηχανισμού. Αυτή η πόλωση είναι συνήθως αρνητική και συχνά θεωρείται και η πιο σημαντική τάση του ενισχυτή. Αν αυτή η τάση τεθεί σε λάθος θέση παρουσιάζεται μεγάλου βαθμού διαταραχή διασταύρωσης (crossover distortion) όσο προσεγγίζεται η λειτουργία τάξης B. Αλλά για αυτή θα μιλήσουμε παρακάτω.



Σχήμα 10 Κλασικός ενισχυτής ισχύος.

6. 4 Σύγχρονη Κατασκευή Λυχνιών

Με την λέξη σύγχρονη ονομάζονται αυτές που κατασκευάζονται από το ογδόντα και μετά, όταν η τεχνολογία των λυχνιών και η βιομηχανική τεχνική είχαν ωριμάσει.



Η φωτογραφία παρουσιάζει μια διπλοτρίοδο και μια πέντοδο εξόδου. Τα διάφορα μέρη συγκροτούνται από δύο μίκα δίσκους μέσα σε μια κυλινδρική γυάλινη συσκευασία. Εφόσον το κόστος κατασκευής είναι σχεδόν το ίδιο γι μια απλή ή για μια πολύπλοκη λυχνία , οι λυχνίες πολλών λειτουργιών είναι κοινές , άρα ένα σετ τεσσάρων λυχνιών περιέχει τέσσερις λυχνίες , η μία εκ των οποίων είναι η ανορθώτρια , αλλά

ένας δέκτης έχει πέντε ή έξι λυχνίες . Πολλές άλλες λειτουργίες είναι κοινές επίσης. Υπάρχουν τρίοδος / διπλοπέντοδος μέσα στην ίδια συσκευασία. Με αυτή θα μπορούσες να χτίσεις ένα ολόκληρο στάδιο εξόδου push –pull . και ένα εγγραφέας κασέτας έχει κατασκευαστεί με αυτή την λυχνία.

6.4.1 Οι λυχνίες σήμερα

Αρχές του 21^{ου} αιώνα , τα στοιχεία στερεάς κατάστασης έχουν πλέον πάρει την θέση σχεδόν όλων των λυχνιών σε όλους τους τομείς. Οι λυχνίες όμως είναι μακριά από την εξαφάνιση τους ακόμα λόγω της εξαιρετικής της ποιότητας , της χαμηλής της τιμής και των ανθρώπων που επιμένουν στην ιδανικότητα της για πολλές χρήσεις και κυρίως για συστήματα ήχου , μάλλον η πορεία της θα συνεχιστεί για αρκετά χρόνια ακόμα. Πολλοί πιστεύουν ότι τίποτα δεν μπορεί να αντικαταστήσει αυτό ανεπαίσθητο θόρυβο και το ζεστό ήχο της λυχνίας . Ας το διαπιστώσουμε !!

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ SPICE

Ο τρόπος που περιγράφεται παρακάτω για την εισαγωγή νέων μοντέλων ισχύει μέχρι την έκδοση Pspice8 . Για νεότερες εκδόσεις πρέπει να συμβουλευτείτε το tutorial.

ΒΗΜΑ 1: Ενεργοποίηση του schematic editor.Επιλογή

File>Edit Library

Αυτό θα μας πάει στην βιβλιοθήκη στοιχείων (editor library) που μοιάζει με το schematic editor. Επιλογή της βιβλιοθήκης όπου θέλουμε να κάνουμε την εισαγωγή του στοιχείου (π.χ eval.slb).

File > Open

ΒΗΜΑ 2: Στην μπάρα εργαλείων υπάρχουν διάφορα σχήματα για την εύκολη σχεδιάσει του μοντέλου . Σχεδιάζετε το μοντέλο

ΒΗΜΑ 3: Έχοντας σχεδιάσει το βασικό διάγραμμα πρέπει να προστεθούν τα pins που καθορίζουν τις εισόδους και εξόδους του στοιχείου. Τα pins βρίσκονται στην γραμμή εργαλείων .

ΒΗΜΑ 4: Από το μενού επιλέγουμε

Part>Pin List

Μπορεί να γίνει αλλαγή των ονομάτων των pin από pin 1~α (άνοδος), pin 2~ g(grid), pin3~C(cathode). Αφαιρώντας κάθε φορά το κλικ από το Display Name.Από το pin attribute αλλάζουν τα ονόματα 'pin = ' από '1' σε 'α' . με τον ίδιο τρόπο αλλάζουν και τα υπόλοιπα.

ΒΗΜΑ 5: Από το μενού επέλεξε

Part >Attributes

Συμπλήρωσε τα πεδία , model ,template ,part refdes .

Για την εισαγωγή μια λυχνία τα πεδία αυτά είναι

Model= 'όνομα λυχνίας' π.χ 12AT7

Template=X^refdes %a%g%c @model

Part =12AT7

Refdes= V?

ΒΗΜΑ 6: Από το μενού επέλεξε

Graphics>BBOX

Αυτό επιτρέπει να σχεδιαστεί το περίγραμμα του μοντέλου . Το περίγραμμα πρέπει να χωράει το στοιχείο . Τοποθετείτε το στοιχείο στο κουτί . Από το μενού επιλέγουμε

Το Graphics> Origin . Τοποθετείτε την αρχή συντεταγμένων στο κέντρο της τριόδους.

ΒΗΜΑ 7: File >Save. Ερωτάσαι για το όνομα του αρχείου., βάζεις το όνομα του στοιχείου . Επιλέγεις File > close για να βρεθείς πίσω στο schematic editor.

Πρέπει να συμπεριληφθεί το αρχείο .subcircuit του στοιχείου .inc (από internet)

Από το μενού επέλεξε

Analysis>Library and Include Files . Browse για να βρεις το αρχείο .inc> add>o.k

Από εδώ και πέρα το στοιχείο θα φορτώνεται κάθε φορά που ανοίγει ο προσομοιωτής

Για την συμπλήρωση του αρχείου .inc μπορεί απλά να ανοίξεις την βιβλιοθήκη ,στην οποία έχεις συμπεριλάβει το στοιχείο , με κάποιο txt editor, και να κάνεις

Copy>paste στο τέλος του αρχείου το αρχείο .inc

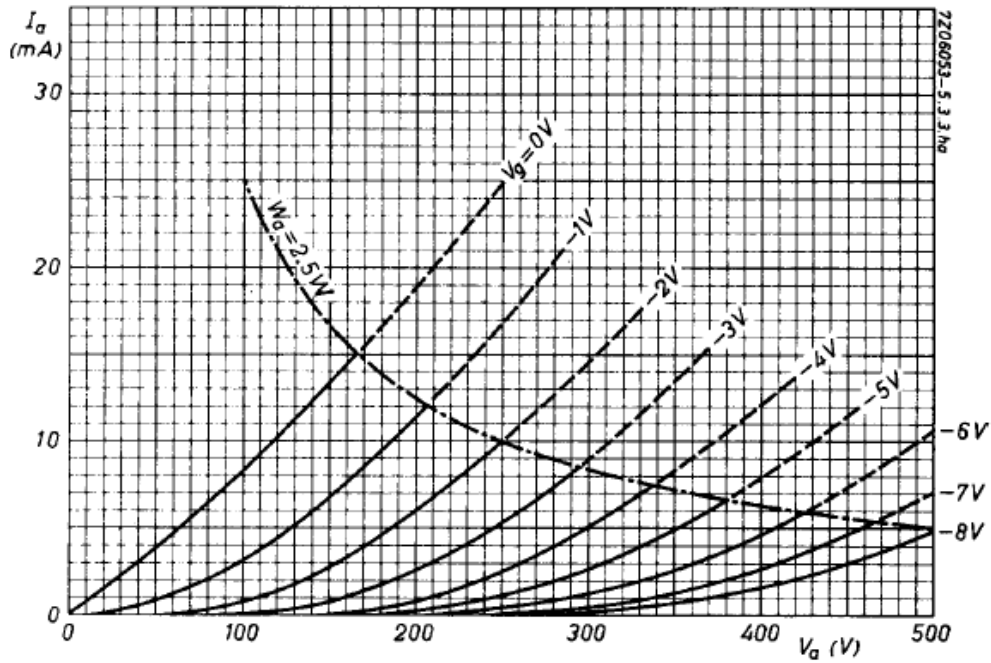
ΠΡΟΣΘΕΤΟΝΤΑΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ ΣΤΟ PSPICE

Για την εισαγωγή μιας βιβλιοθήκης πρέπει να υπάρχουν 2 φάκελοι .π.χ tube.LIB ,tube.SLB
Installing (tube.slb)
Schematic>Options>editor Configurations>Library Settings>Browse>Add* >o.k>o.k

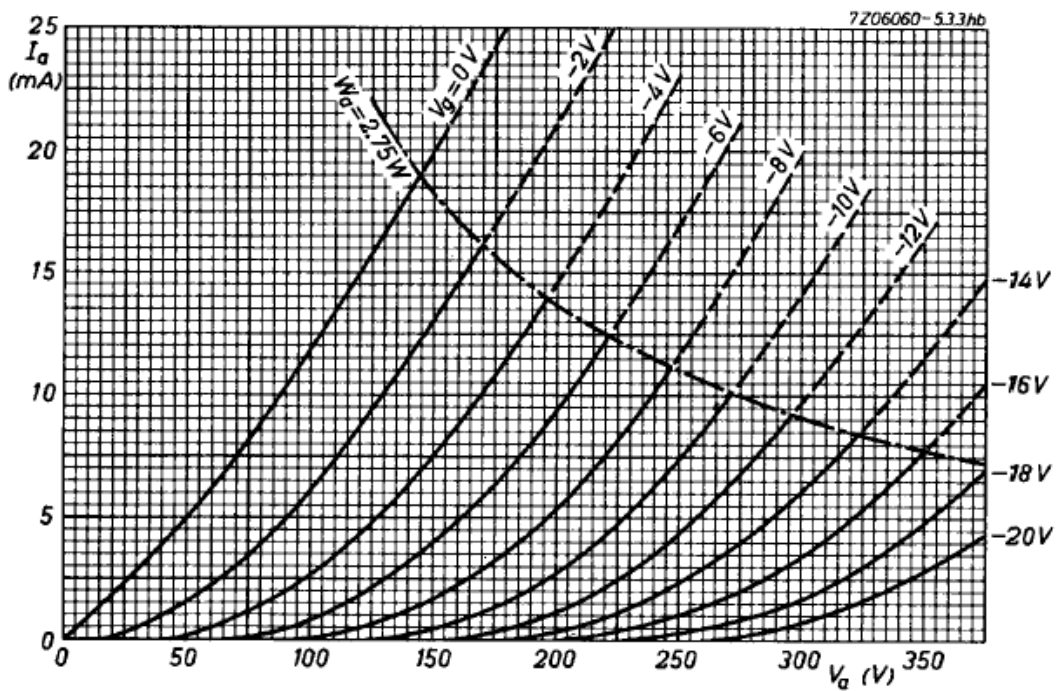
Installing (tube.lib)
Schematic>Analysis>Library& Include >Browse>Add library*>o.k>o.k

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

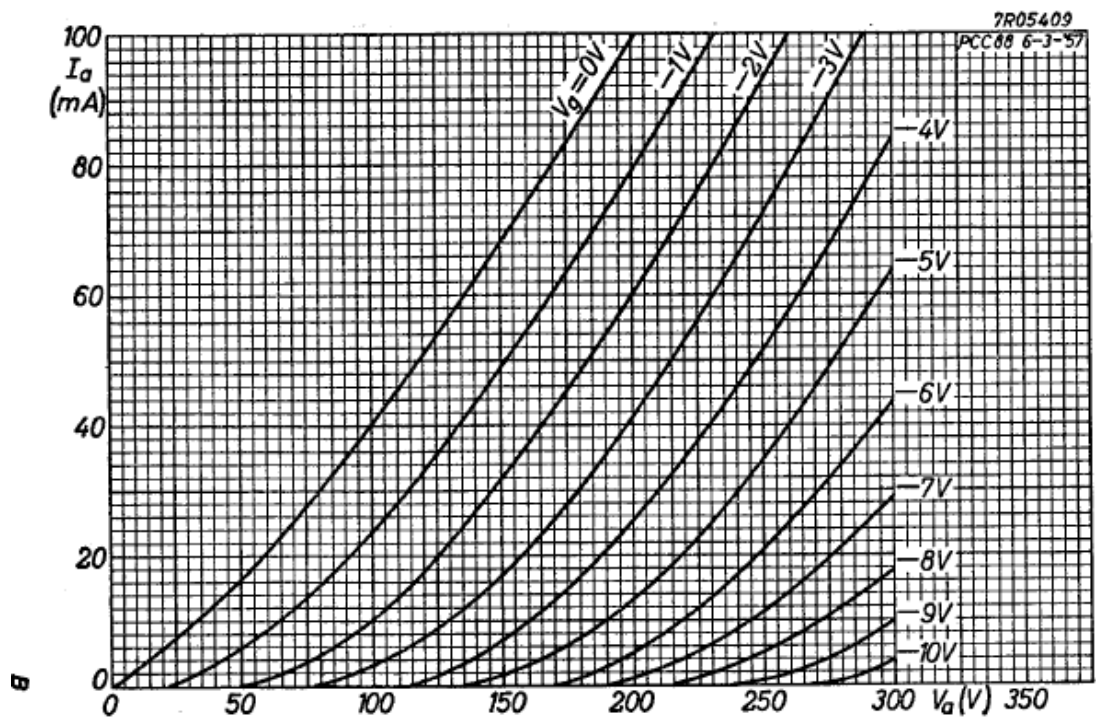
Χαρακτηριστικές λυχνιών που χρησιμοποιήθηκαν



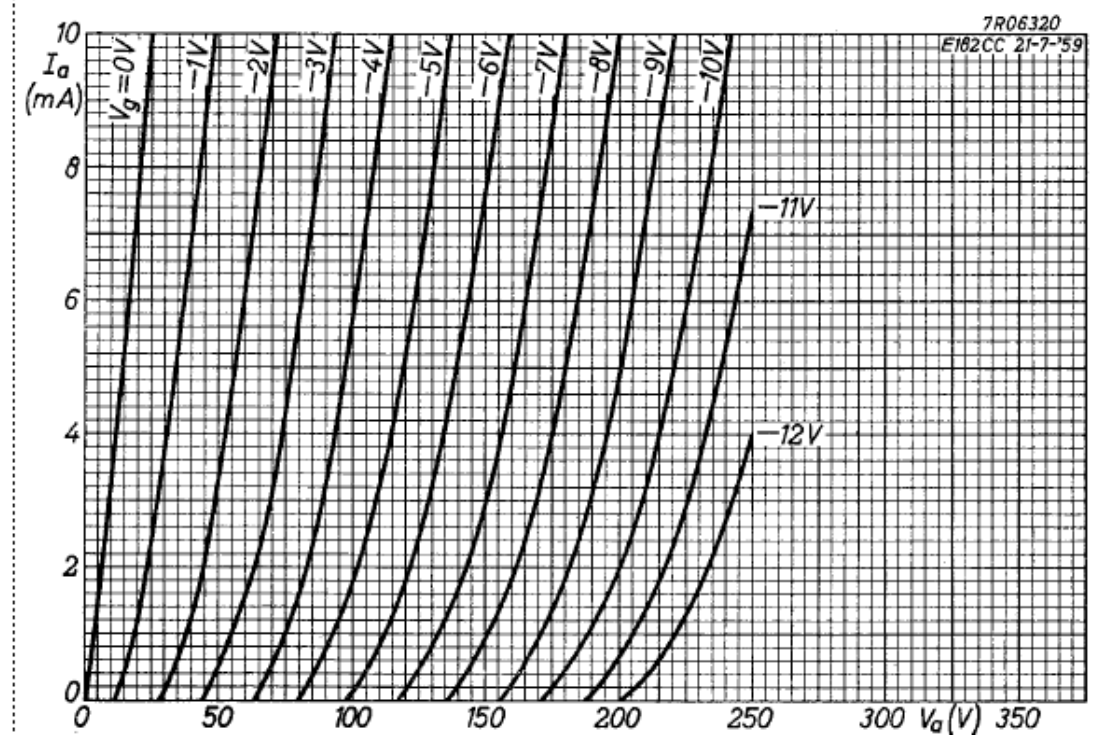
ECC81 : I-Va



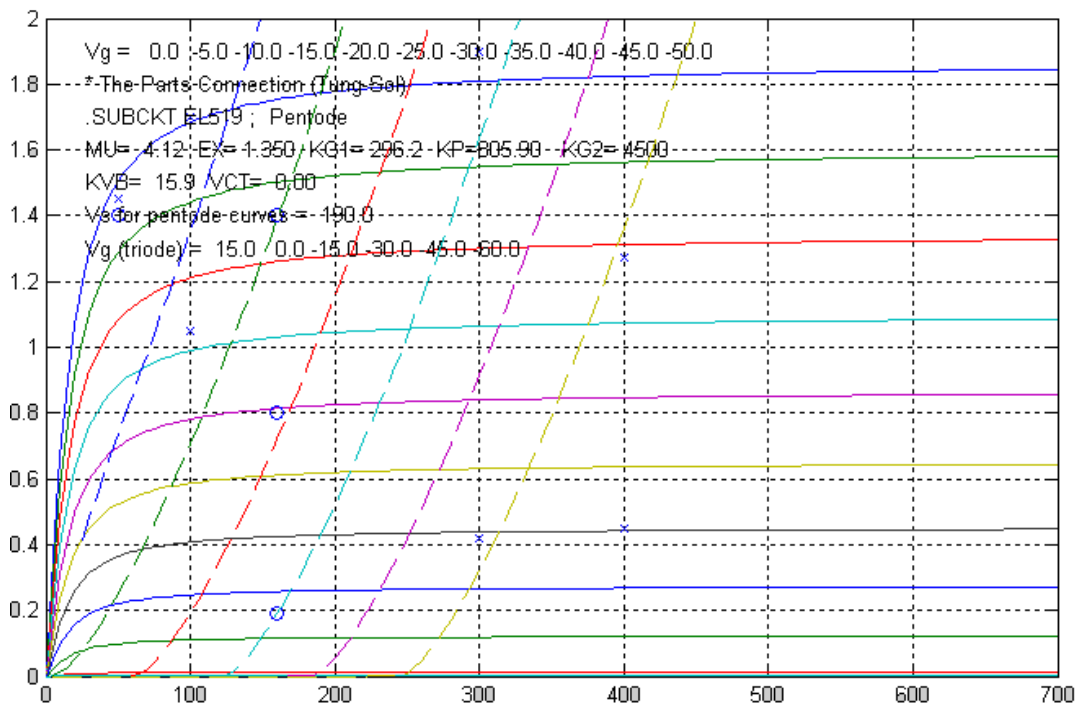
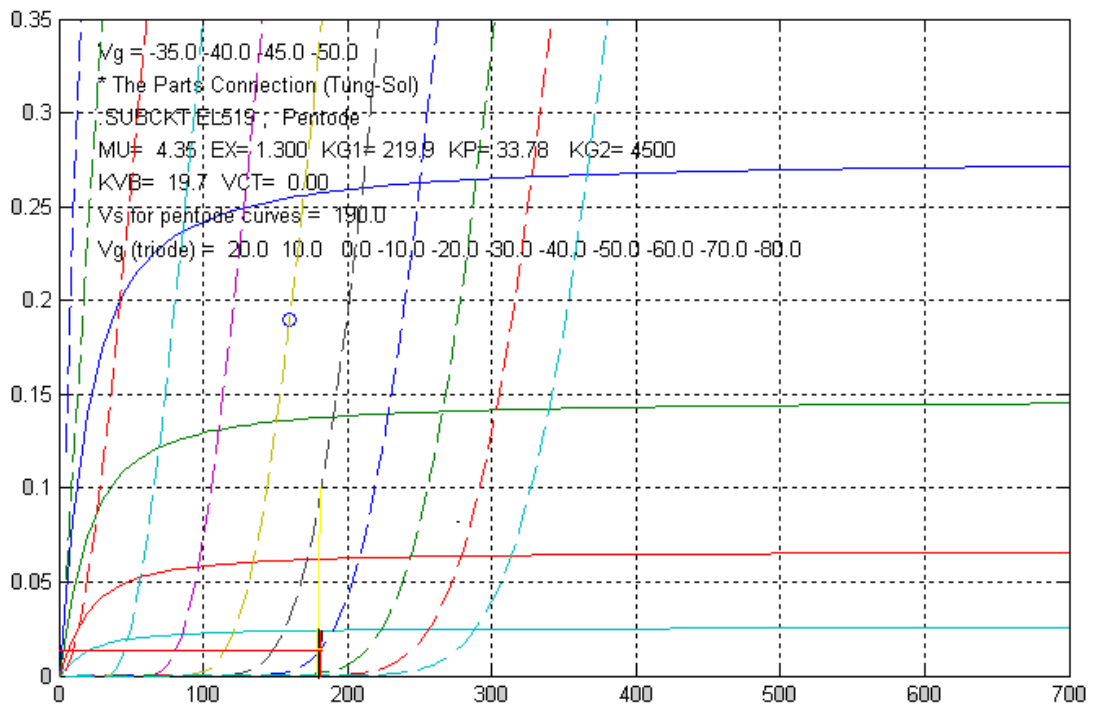
ECC82: I-Va



ECC88: I-Va



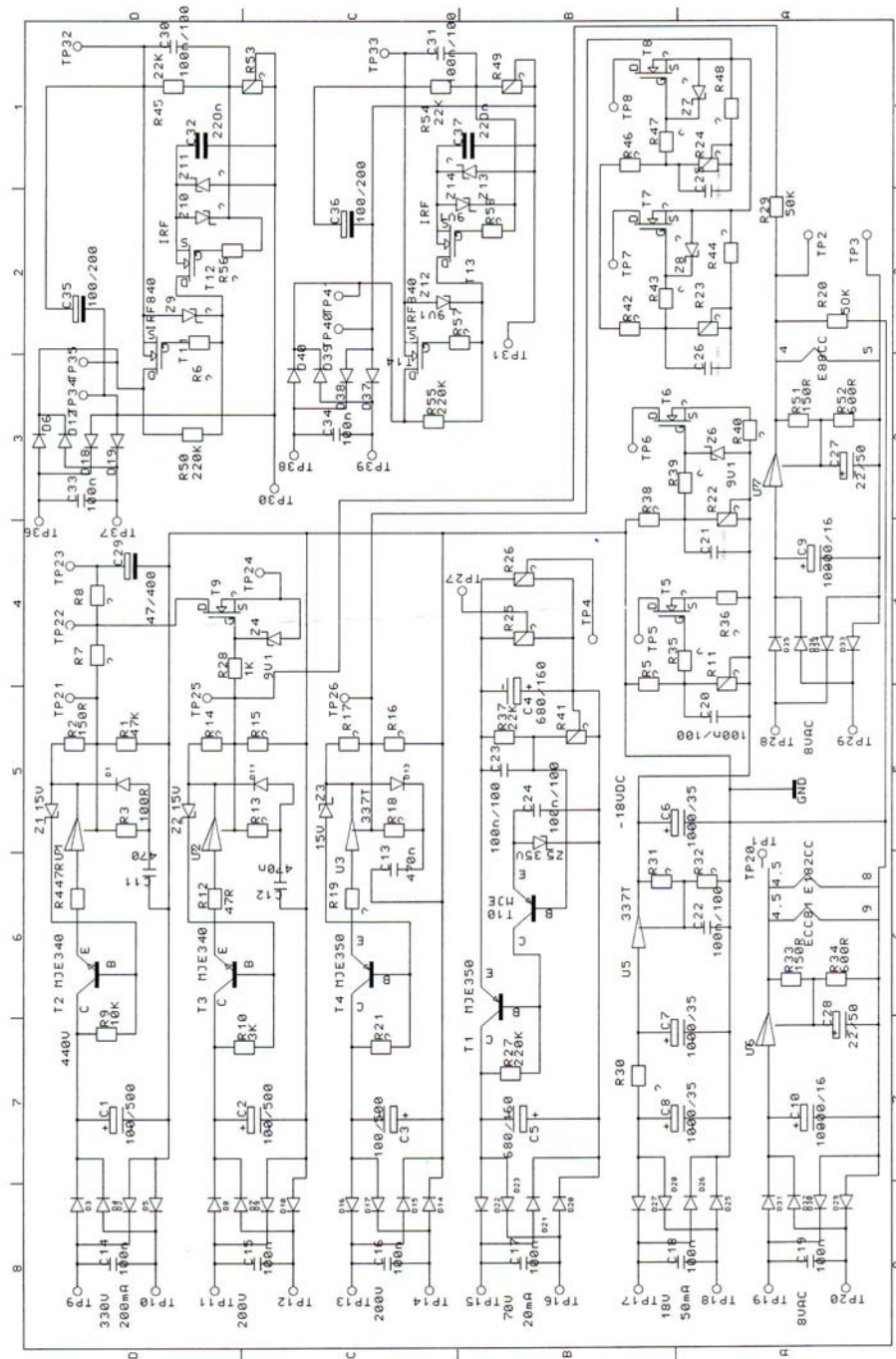
ECC182: I-Va



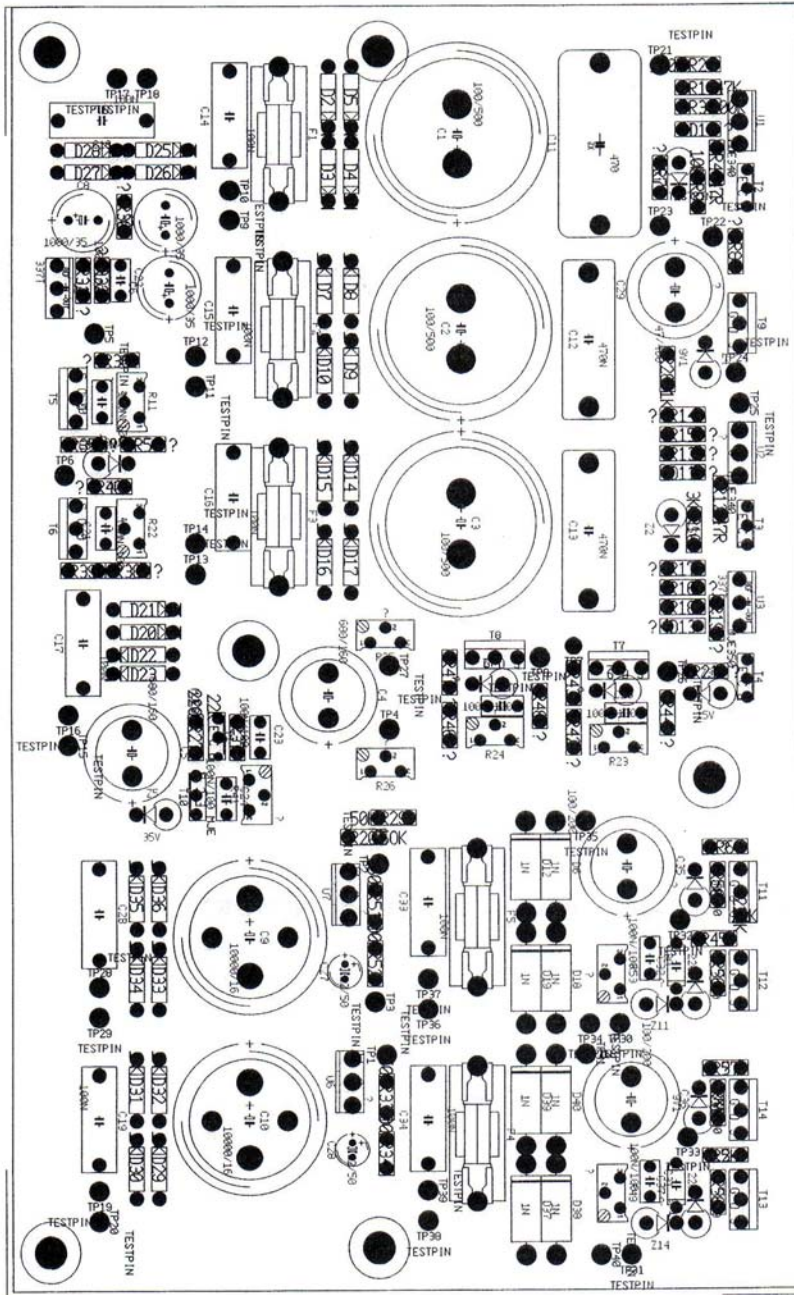
PL519: I-V σε συνδεσμολογία πεντόδου και τριόδου από matlab.
 Οι γραφικές αυτής δεν ήταν διαθέσιμες σε αναγνώσιμη κατάσταση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

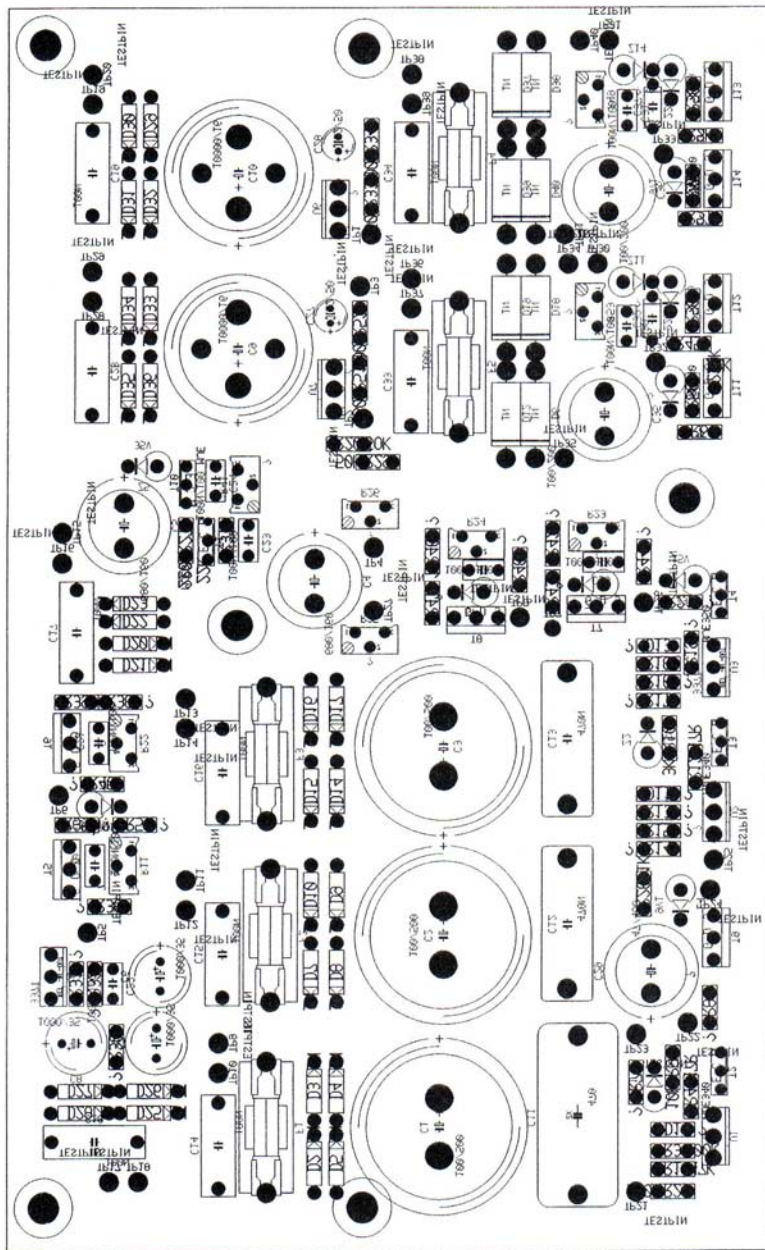
Η σχεδίαση του τροφοδοτικού μέσα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα και το τυπωμένο κύκλωμα παρουσιάζονται παρακάτω.



ULTIboard
PCB Design



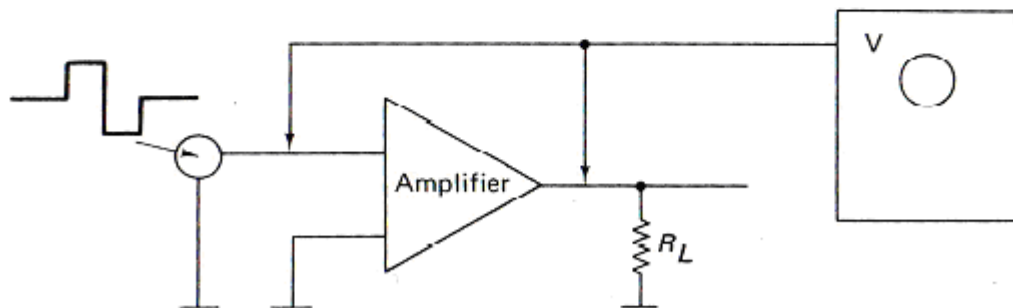
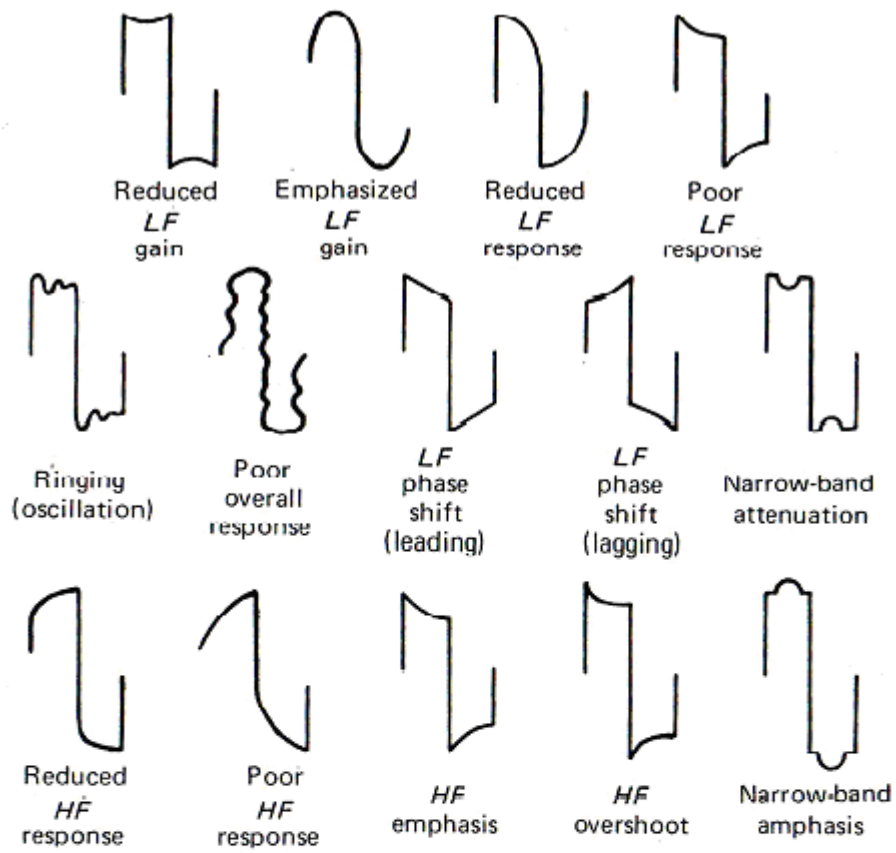
OTL-519.10 (Nov. 25, 2004) (21:06) (NG) SCALE: 100% ROTATED
Drill Ref Pnt: 0.000, 0.994 (mm)



OTL-519.10 (Nov. 25, 2004) (20:57) (NG) SCALE: 100% ROTATED REFLECTED
 Drill Ref Pnt: 133.709, 0.994 (mm)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Έλεγχος παραμόρφωσης με χρήση τετραγωνικού παλμού



Βιβλιογραφία

- [1] Power Supplies Part A /Linear Power Supplies, Odon Ferencz
- [2] Introduction to Pspice manuals For Electronic Circuits, J.W.Nilson,Susan Riedel
- [3] Engineering Circuit Analysis with Pspice & Probe, Roge Conant
- [4] Spice, Paul.W.Tuinenga
- [5] Mullard Tube Circuits For Audio Amplifiers, Mullard
- [6] Radio Designer's Handbook, Langford-Smith
- [7] Valve Amplifiers, Morgan Jones
- [8] Valve & Transistor Audio Amplifiers,John Linsley Hood
- [9] Audio Valve Amplifiers, Rainer zur Linde
- [10] Handbook of Basic Electronic Troubleshooting, John D.Lenk
- [11] Radio Amateur's Handbook, ARRL
- [12] Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα, Sendra-Smith
- [13] Ηλεκτρονικά κυκλώματα
- [14] Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική , Millman-Χαλκιάς

Περιοδικά

- [1] Ελέκτορ
- [2] Ηχος/Εικόνα
- [3] Ηλεκτρονικά Νέα

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις

- [1] Birotechnology
- [2] Tube lover Anonymous
- [3] Dorsey's Otl Design
- [4] Atma-sphere
- [5] Andrea Ciuffoli's page
- [6] www.audiodesignguide.com
- [7] www.eng.umu.se
- [8] www.meta-gizmo.com
- [9] www.alphalink.com
- [10] Alan Kimmel Otl
- [11] www.tubecad.com
- [12] designing an amplifier
- [13] Aqua-blue
- [14] www-sul.stanford.edu/
- [15] Fred Nachbaur, Dogstar Music
- [16] ppamp
- [17] Esp
- [18] Electrical engineering training series

- [19] etols
- [20] www.milbert.com
- [21] alt.guitar.amps
- [22] audiophile-wikipedia
- [23] www.members.aol.com
- [24] rec.audio.tubes
- [25] steve page
- [26] tubes amplifier
- [27] 6C33C OTL
- [28] Circlotron History
- [29] Headwize project
- [30] Glassware
- [31] Jeremy Epstain
- [32] www.normankoren.com